

Системы речевого взаимодействия «человек-машина» и разработка алгоритмов преобразования «текст-речь»

Р. К. Потапова^{1,*}, В. Г. Санников^{2,†}, В. В. Потапов^{3,‡}

¹Институт прикладной и математической лингвистики,
Московский государственный лингвистический университет
Россия, 119034, Москва, ул. Остоженка, д. 38

²Московский технический университет связи и информатики,
Россия, 111024, Москва, ул. Авиамоторная, д. 8А

³Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, филологический факультет,
лаборатория компьютерных обучающих программ. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы
(Статья поступила 07.07.2017; Подписана в печать 13.09.2017)

Естественные языковые интерфейсы систем искусственного интеллекта, как правило, проектируются с ориентацией на обмен текстовыми (письменными, символическими) сообщениями. Однако такое взаимодействие между человеком и машиной зачастую оказывается неудобным и неэффективным. Речевой канал коммуникации предоставляет оптимальные возможности как по скорости, так и по комфортности взаимодействия, что имеет большое значение для эргономичности труда операторов автоматизированных систем.

PACS: 43.72+q

УДК: 81'32, 81'33

Ключевые слова: синтез речи, правила анализа текста, сегментная программа, супraseгментная (просодическая) программа.

ВВЕДЕНИЕ

Рост вовлеченности человека в автоматизированные производственно-экономические циклы привел к возникновению нового прикладного научного направления — речевых компьютерных технологий. В рамках данного направления ведется разработка систем, реализующих речевое человеко-машинное взаимодействие, а также систем распознавания речи, идентификации и верификации говорящего по речи, медицинской диагностики по речевым признакам, а также помехозащищенной передачи речевого сигнала. Все перечисленные разработки основываются на фундаментальном изучении процессов речевого производства и речевого восприятия, а также связи между речевой и мыслительной деятельностью человека [1–6].

1. СПЕЦИФИКА ТЕХНОЛОГИИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ «ТЕКСТ–РЕЧЬ»

Наряду с общими проблемами речевой коммуникации, затрагивающими аспект автоматического понимания речи (преобразования «текст–смысл» и «смысл–текст»), существуют специфические проблемы, связанные с реализацией преобразований «текст–речь» и «речь–текст» — синтеза и распознавания (анализа) речи. Если в естественных языковых интерфейсах, ориентированных на письменную речь, под «текст»

обычно понимается орфографическая запись речевых сообщений, то в системах речевой коммуникации текст чаще фигурирует в форме фонетической транскрипции. Поэтому при разработке систем речевого взаимодействия имеет смысл сконцентрироваться в первую очередь на преобразовании «речь–транскрипция» и «транскрипция–речь». Фонема как вербальная единица выполняет две функции: с одной стороны, она соотносится с единицами письменного текста, с другой — является обозначением (вербальным коррелятом) конкретного речевого звука (аллофона, фонемы). Например, в фонетической системе американского варианта английского языка насчитывается 42 фонемы, включая гласные, дифтонги, полугласные и согласные. Следует отметить, что в данном случае мы имеем дело с открытым множеством. Более того, не существует точного однозначного соответствия между конкретными звуками речи (аллофонами) и фонемами, так как звуки речи подвергаются влиянию множества экстралингвистических факторов, таких, как индивидуальные особенности речи говорящего, его психоэмоциональное и физическое состояние, характеристики трактов связи и носителей информации и т. д. Таким образом, задачи, стоящие перед разработчиками систем речевого человеко-машинного взаимодействия, оказываются весьма сложными. Не накладывая никаких специфических ограничений, связанных с языком коммуникации или применяемыми конкретными методами распознавания и синтеза речи, можно представить себе общую структуру системы речевого взаимодействия «человек-машина» так, как это показано на рис. 1.

Чтобы получить представление о функциональных требованиях к такой системе, рассмотрим ситуацию коммуникации двух или более пользователей, рабо-

*E-mail: rkpotaпова@yandex.ru

†E-mail: tes_mtusi@mail.ru

‡E-mail: volikpotapov@gmail.com

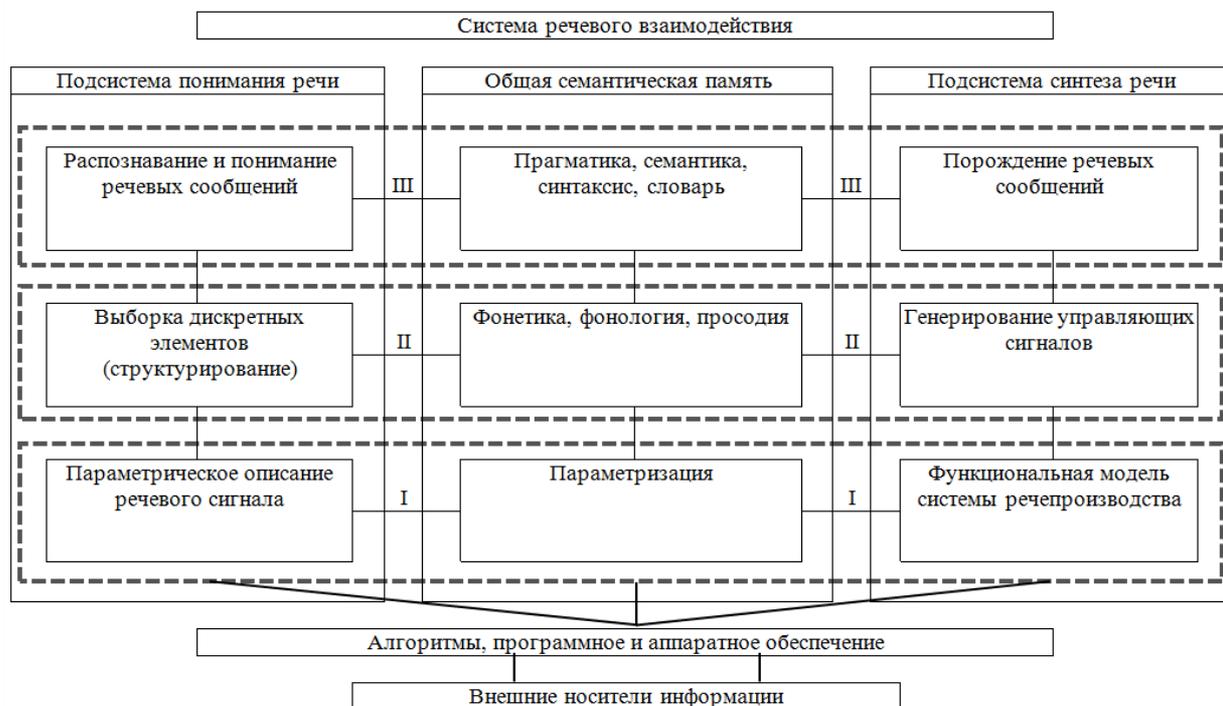


Рис. 1: Структура системы речевого взаимодействия «человек–машина»

тающих с компьютерами и другими техническими устройствами. В этом случае система речевого взаимодействия является частью более общей интерактивной системы управления, функционирующей в данной проблемной области, и эта система является частью рабочей среды. Если допустить, что речь является единственным каналом коммуникации в этой системе, то вся проблемная область должна быть представлена в семантической памяти системы речевого взаимодействия. Анализ перцептивных моделей и реализации синтеза речи показывает, что такие компоненты системы речевого взаимодействия, как подсистема понимания речи, общая семантическая память и подсистема синтеза речи, должны быть организованы с учетом иерархических уровней обработки информации. На рис. 1 показаны только три таких уровня; при практической реализации системы речевого взаимодействия их число может возрасти за счет включения промежуточных уровней. Основная функция подсистемы понимания речи заключается в распознавании речевого сообщения и установлении его семантики. На основании результата этих процессов система речевого взаимодействия «дает» ответ, который может представлять собой либо ответное речевое сообщение (реализуемое при помощи подсистемы синтеза речи), либо действие (некоторое адекватное неречевое поведение управляемого объекта). Подсистема понимания речи определяет значение поступившего речевого сообщения (речевой команды), опираясь на измеренные параметры речевого сигнала и загруженную в систему базу знаний. Основная функция подсистемы синтеза речи заключается

в генерировании речевых сообщений (ответов, вопросов, указаний) по их математическому описанию. Синтезированная речь является новым каналом передачи информации (функционирующим наряду с визуальными и традиционными звуковыми средствами оповещения), используемым в системах управления и оповещения, применяемых, например, в системах пожарной сигнализации и жизнеобеспечения [7].

Иерархический уровень I. В случае подсистемы понимания речи этот уровень включает модуль первичной обработки речевого сигнала, результатом работы которого становится параметрическое описание входного речевого сообщения. Пригодное для дальнейшего анализа описание должно содержать модель порождения этого сообщения (что соотносится с первым уровнем подсистемы синтеза речи), параметры которой соответствуют входному речевому сообщению. Это позволяет поместить на первом иерархическом уровне организации системы речевого взаимодействия некоторую часть подсистемы общей семантической памяти.

Иерархический уровень II. На данном уровне подсистема понимания речи производит преобразования, приводящие к выделению дискретных единиц речевого потока: сегментов, фонем, звукотипов и т.д. Подсистема синтеза речи на этом уровне порождает управляющие сигналы для синтеза вышеперечисленных дискретных единиц. Второй уровень подсистемы общей семантической памяти включает реализацию структуры, используемой для хранения знаний о речевых единицах: просодии (ударение и интонация), фонологии (включая вариативность, связанную с различными ти-

пами ударения), фонетике (акустические характеристики звуков речи).

Иерархический уровень III. Его традиционно называют синтактико-семантическим, так как он получает на вход информацию, представленную в виде набора дискретных единиц. На этом уровне подсистема понимания речи завершает распознавание и создает полное описание речевого сообщения; подсистема синтеза речи порождает речевое сообщение, опираясь на его семантику; подсистема общей семантической памяти организует хранение следующих видов информации: лексики (акустических образов слов), синтаксиса (грамматической модели языка), семантики (значений слов и предложений) и прагматики (текстов диалогов, «привязанных» к конкретным проблемным ситуациям).

С позиции независимого наблюдателя система речевого взаимодействия представляет собой набор устройств (с заложенными в них соответствующими алгоритмами и программами), обнаруживающих изменения в рабочей среде, и еще один набор устройств, при помощи которого система речевого взаимодействия может воздействовать на эту среду (например, путем передачи информации в синтезированном речевом сообщении). В современных системах речевого взаимодействия подсистемы распознавания и синтеза речи обычно работают независимо друг от друга. Возможна даже ситуация, когда из двух этих подсистем реализована только одна — та, которая необходима для решения конкретной практической задачи. Наиболее перспективным на базе синтеза произвольных речевых сообщений с разборчивостью и натуральностью, приближающимися к естественной человеческой речи, является артикуляционный синтез. Современный уровень развития теории речеобразования позволяет построить достаточно подробную модель артикуляторного тракта. Однако ее сложность пока не позволяет создать техническое устройство артикуляторного синтеза с приемлемыми технико-экономическими характеристиками.

В настоящее время конкурентоспособного уровня достигли синтезаторы речи компилятивного типа и устройства синтеза речи по правилам на основе лингвоакустического подхода. Основу этих синтезаторов составляют либо формантные модели речеобразования разной степени сложности, либо различные рекуррентные модели с линейным предсказанием [8, 9]. Методы компиляции на уровне словоформ обеспечивают высокую разборчивость и натуральность звучания при ограниченном наборе воспроизводимых сообщений. При этом аппаратные и вычислительные затраты определяются в основном применяемым методом генерации речевых сигналов, поскольку для соединения словоформ во фразы требуется минимум вычислений. Интенсивно развиваются методы синтеза речи из более мелких речевых элементов — фонем, аллофонов, слогов, дифонов (диад), трифонов и т.д. Проблема состоит в разрешении взаимообусловленных противоречий между числом таких элементов, объемом памяти, необходимой для хранения, и способами их компиля-

ции. Число N речевых элементов по различным оценкам колеблется в пределах от сотен до десятков тысяч.

Проведенный сравнительный анализ позволяет заключить, что компилятивные синтезаторы позволяют использовать лишь ограниченный набор сообщений, а синтез по правилам не удовлетворяет требованиям некоторых пользователей к качеству (натуральности) синтезируемой речи. Исходя из известных недостатков и достоинств рассматриваемых методов синтеза, компилятивный синтез следует рекомендовать для применения в системах, где набор речевых сообщений может быть ограничен, но имеются жесткие требования к естественности и разборчивости синтезированной речи. Синтез по правилам незаменим в сложных системах речевого диалогового управления, информационно-справочных и подобных им системах, где требуется формировать большой объем разнообразных сообщений, а условия работы пользователей системы не накладывают слишком строгих ограничений на естественность синтезированной речи [10–12]. Следует также учитывать, что в сложных условиях восприятия (сильные внешние шумы, интенсивная операторская деятельность, стрессовые ситуации и пр.) разборчивость синтезированной речи снижается гораздо быстрее, чем естественной. Это, очевидно, обусловлено «недостаточной избыточностью» синтетической речи, и можно предположить, что преимущество имеют методы, сохраняющие больше информации о естественном речевом сигнале, т.е. компилятивные методы. Анализируя сказанное, приходим к заключению о том, что *перспективным следует считать такое направление в проблеме синтеза речи, которое объединяет полезные свойства компилятивного синтеза и синтеза речи по правилам.*

Синтез речи по правилам, как известно, приводит к созданию синтезаторов речи с неограниченным словарем. В общем виде система, синтезирующая речь по заданному тексту, включает в себя две последовательные процедуры: анализ текста и синтез управляющих данных. В свою очередь они состоят из последовательности некоторых основных процедур, каждая из которых может быть представлена в виде совокупности алгоритмов обработки вполне определенных массивов входных и выходных данных. Ниже представлены в обобщенном виде указанные процедуры и их содержание. Функционально отдельные модули могут объединяться, либо дробиться на более мелкие модули, но общая логика построения системы остается неизменной. *Правила анализа текста* предназначены для фонетического членения речи (преобразования букв в речевые элементы) и определения параметров, влияющих на интонационный комплекс синтезируемой фразы с учетом грамматических (морфологических, синтаксических) и семантических особенностей языка. Функциональные процедуры подсистемы включают: *преобразования символов в стандартную форму фонетической транскрипции.* Для каждого слова текста в конкретной грамматической форме (словофор-

ме) составляется фонетическая транскрипция. Причем в различных синтезаторах это реализуется по-разному. В упрощенных вариантах коммерческих синтезаторов оперируют правилами, устанавливающими соотношение между фонетическими элементами и эквивалентами фонем. В универсальных исследовательских синтезаторах речи, таких, например, как DECtalk и MITalk, фонетическая транскрипция осуществляется на основе морфов. Морфы аффиксов и корней составляют базовый словарь (для английского языка около 12000 морфов), который содержит также информацию о поэлементном составе, произношении и месте в речи этих морфов. Слова представляются и анализируются в виде строки морфов. При этом более 95% слов текста, включая многосложные и иностранные слова, успешно преобразуются в фонетическую запись.

2. ОСОБЕННОСТИ СИНТЕЗА АМЕРИКАНСКОГО ВАРИАНТА АНГЛИЙСКОЙ РЕЧИ

Программа синтеза английской речи в ее американском варианте должна включать следующие типы речевых высказываний:

1. простые утверждения, состоящие только из одной смысловой группы;
2. вопросительные конструкции со схожей просодической структурой;
3. вопросы, требующие ответа «да» или «нет»;
4. простые предложения, состоящие более чем из одной смысловой группы;
5. сложные предложения;
6. комплекс предложений, образующих единое смысловое целое [13].

Представлены результаты разработки программы синтеза английской речи с ориентацией на определённые типы речевых высказываний: утверждения, состоящие только из одной синтактико-смысловой группы; вопросительные конструкции со схожей просодической структурой; вопросы, требующие ответа «да» или «нет»; простые предложения, состоящие из нескольких смысловых групп; сложные предложения различной степени сложности.

Алгоритмы преобразования орфографических текстов в звучащую речь содержат два базовых блока информации: сегментной (звуковой, слоговой) и супraseгментной (просодической). Исходными данными при этом служат результаты предварительного акустического анализа текстов, позволяющего определить специфику сегментных и супraseгментных единиц. Дальнейшая разработка системы кодов перевода этих единиц в составляющие программы синтеза и применение

алгоритмов сочленения данных единиц позволяли реализовать высококачественный синтез речи с опорой на печатный текст.

При синтезе речи по правилам на вход синтезирующей программы подается фонематическая информация. Соотношение между фонетическими элементами и эквивалентами фонем, обозначаемых буквенными символами, представлено в табл. 1.

В табл. 1 элементы, обозначаемые со звездочкой*, в составе слогов в предпаузальной позиции не сопровождаются увеличением длительности. Программа может создавать многообразие переходов, зависящих от величин, заданных в таблице на входе. Амплитудные и частотные переходы между гласными представляют собой прямые линии, так как длительности внешнего перехода одинаковы, а пограничная величина — среднее значение между стационарной частью доминанты первой и второй гласной.

Качество глухого фрикативного [H], соответствующего английскому [h], в значительной степени модифицируется под влиянием соседней гласной. Таким образом, длительность внешнего перехода [H] равна нулю, а длительность внутреннего приблизительно равна длительности всего элемента. Внешние переходы F2 для смычных взрывных или назальных определяются значениями на границе между элементами, являющимися средними значениями локуса, характеризующего элемент и стационарную часть соседнего элемента. Во многих случаях, например, для взрывных, назальных и фрикативных длительность внутреннего и внешнего переходов равна нулю. Применительно к данной ситуации амплитудные переходы могут быть выражены отсутствием непрерывности на границе между стационарным участком доминанты и соседними элементами. При синтезе дифтонгов используется последовательность из двух гласных элементов. В таблице на входе для первого элемента, который является доминантой, точно определяется длительность перехода. Взрывной согласный представлен последовательностью трех элементов, соответствующих участку смычки, участку возрастания энергии в начале отступа и участку спада энергии в конце отступа. Второй элемент доминирует над первым и третьим и определяет амплитудные и частотные переходы при нулевой длительности. Таким образом на входе контролируется информация о переходах к взрывным и от взрывных. При синтезе звонких фрикативных эти звуки рассматриваются как последовательности из трех элементов, хотя генераторы шума и импульсов не могут функционировать одновременно. Первый элемент, длительность которого равна половине длительности всего суммарного элемента, всегда звонкий. Второй элемент нулевой длительности (подобно второму элементу взрывных) содержит переход между первым и третьим элементами, над которым он доминирует. Третий элемент соответствует участку глухости в программе, если следующий за ним элемент является глухим согласным. В противном случае он идентичен первому элементу.

Таблица I: Соотношение между фонетическими элементами и эквивалентами фонем, обозначаемых буквенными символами, для английского языка (американский вариант)

Q	silence	F	f	AL	l,	ER	F	Q	silence	F	f	AL	l,	ER	F
End	End	TH	∅	R	r(initial)	AR	Y	G	G	Z2	*AA	Ж	OU	ai,I	
*P	P	S	S	RR	r(medial)	AW	]	M	M	ZH	Г	*U	H	OA	oi,I
*T	T	SH	•	W	W	UU	U	AM	M,	*CH	±	*O	Z	IA	Wc
*K	K	H	H	Y	j	AI	Fw	N	N	J	§	OO	I,I	AIR	Ec
B	B	V	v	*I	W	IE	Cw	AN	N,	L	l	*A	C	OOR	i,ic
D	D	DH	P	*E	E	OI	]w	NG	'H	LL	{	EE	v	OR	]c

Глухая аффриката [tʃ] представлена последовательностью двух элементов. Данные, входящие в таблицу для первого элемента, те же, что и для [t]; для второго элемента — те же, что и для [SH], который представляет [ʃ]. Длительность обоих элементов, однако, несколько уменьшена. Звонкая аффриката [dʒ] представлена четырехэлементной последовательностью, созданной таким же образом: взяты значения [D] и значения фрикативной последовательности [ZH; QQ; Z]. Данная программа осуществляет синтез звуковых сегментов звучащей речи. Для полной реализации синтезированной речи необходима специальная программа просодических параметров.

3. ПРОСОДИЧЕСКАЯ ПРОГРАММА СИНТЕЗА

Подобно сегментной программе просодическая программа имеет два входа. К сегментной информации добавляются просодические маркеры: ['] — предшествует ударному слогу значимого в смысловом отношении слова; [•] — нисходящий тон, характеризующий наличие конечной паузы; [,] — нисходящий тон, характеризующий наличие неконечной паузы; [+] — нисходяще-восходящий тон, характеризующий наличие конечной паузы; [:] — нисходяще-восходящий тон, сопровождающий неконечную паузацию; [?] — восходящий тон, за которым следует конечная пауза. Алгоритм выделения просодической информации был построен на основе того, что в каждый момент времени для задания просодики используется информация о текущих речевых единицах. Получаемый в результате работы алгоритма массив

$$\Pi = \left\{ C_k; P_k^{(2)}; M_k \right\},$$

где $k=(1+4)$ используется как входная информация для формирования сигналов просодики, функцией которого является формирование сигналов управления работой таймера и источников возбуждения. Зависимость темпа произнесения i -той речевой единицы ранга от числа входящих в нее единиц ранга $(k+1)$ может быть представлена выражением:

$$\left[V_k^{(i)} \right] = \left[V_{k-1}^{(i)} \right] C_{k-1}^{(i)} \frac{\alpha_k}{M_{k+1}}. \quad (1)$$

Эта зависимость выражает линейную интерпретацию коррекции временных интервалов между слоговыми командами и отражает характерное для связной речи стремление затрачивать на произнесение речевых единиц одинакового ранга одинаковое время. Влияние на величину темпа смысловой выделенности речевой единицы задается в соответствии с выражением:

$$\begin{cases} 0 \text{ при } P_k^{(2)} \neq 0. \\ \left[V_k^{(i)} \right] = V_k B_k \text{ при } P_k^{(2)} = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Уменьшение темпа при произнесении конечного слога фразы отражается следующим образом:

$$\begin{cases} V_\gamma \text{ при } P_k^{(1)} \neq 0, \\ V_\varphi^{(i)} = V_k B_k \text{ при } P_k^{(1)} = 0. \end{cases} \quad (3)$$

В выражениях (1), (2), (3) множители α_k , β_k , γ_k являются весовыми коэффициентами влияния. Процедура автоматического синтеза интонационных контуров частоты основного тона (Гц) и интенсивности (I) сводится, таким образом, к указанию главноударных гласных синтагм и фразы относительно положения мелодического максимума. Следовательно, исходными данными для генерации контуров являются значения и тип интонации:

$$P_2^{(2)}; P_3^{(2)}; \left\{ \left[P_2^{(1)} = 0 \right] V \left[P_3^{(1)} = 0 \right] V \left[P_4^{(1)} = 0 \right] = 1 \right\}.$$

Форма соединения используемых точек контура не оказывает существенного влияния на восприятие просодии. Таким образом, алгоритмы преобразования орфографических текстов в звучащую речь содержат два базовых блока информации: сегментной (звуковой, слоговой информации) и супрасегментной (просодической информации). Исходными данными при этом служат результаты предварительного акустического анализа текстов, позволяющего определить специфику сегментных и супрасегментных единиц. Дальнейшая разработка системы кодов перевода этих единиц в составляющие программы синтеза и применение алгоритмов сочленения данных единиц позволят реализовать высококачественный синтез речи с опорой на печатный текст.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Возможности речевого общения с системами искусственного интеллекта придает все большее значение, в частности, в робототехнике, поскольку в ряде случаев связь человека с машиной должна осуществляться на расстоянии, например, по телефонному каналу [14]. Речь является для человека наиболее удобным и естественным способом обмена информацией. При

таком способе общения человек делает меньше ошибок, меньше устает, быстрее реагирует, а скорость обмена информацией выше, чем при других способах — визуальном, тактильном, тонально-звуковом. Отсюда следует, что область применения синтезаторов речи достаточно широка, а экономические эффекты и сфера использования огромны.

-
- [1] Сорокин В. Н. Синтез речи. М.: Наука, 1992.
[2] Сорокин В. Н. Речевые технологии. 2008. № 1. С. 18.
[3] Михайлов В. Г. Из истории исследований преобразования речи // Лингвистическая полифония: Сб. статей в честь юбилея проф. Р. К. Потаповой. М., 2007. С. 892.
[4] Потапова Р. К. Речевое управление роботом. Изд. 2-е, перер. и доп. М.: КомКнига, 2005.
[5] Потапова Р. К. Речь: коммуникация, информация, кибернетика. Изд. 4-е, доп. М.: Книжный дом «Либроком», 2010.
[6] Потапова Р. К., Михайлов В. Г. Основы речевой акустики. М.: ИПК МГЛУ «Рема», 2012.
[7] Ротарова Р. Speech dialog as a part of interactive «Human-machine» systems // 1st International conference 2016 (ICR 2016). LNCS. 9812. Heidelberg: Springer, 2016. P. 208.
[8] Зиновьева Н. В., Кривнова О. Ф. Вестн. Моск. ун-та. Сер. 9. Филология. 1994. № 3. С. 27.
[9] Кривнова О. Ф. Speech tempo control in automatic speech synthesis // Proc. of international conference «SPECOM'2007». Moscow: MSLU, 2007. P. 277.
[10] Klatt D. H. J. of the Acous. Soc. Am. 1987. 82, № 3. P. 737.
[11] Holmes J. N. Speech synthesis // Frontiers of speech communication research. New York: Academic Press, 1979. P. 287.
[12] Allen J., Hunnicutt S., Klatt D. From text-to-speech. The MITalk system. Cambridge Univ. Press, 1987.
[13] Потапова Р. К., Потапов В. В. Фонетическая основа систем преобразования «текст-речь» (на примере американского варианта английского языка) // Фонетика сегодня. Материалы VIII межд. науч. конф. 28–30 октября 2016 г. М.; СПб.: Нестор-История, 2016. С. 87.
[14] Плотников В. Н., Суханов В. А., Жигулевцев Ю. Н. Речевой диалог в системах управления. М.: Машиностроение, 1988.

Speech communication systems «human-machine» and development of Text-to-Speech algorithms

R. K. Potapova^{1,a}, V. G. Sannikov^{2,b}, V. V. Potapov^{3,c}

¹Institute of Applied and Mathematical Linguistics, Moscow State Linguistic University, Moscow 119034, Russia

²Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, 111024, Russia

³Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991, Russia

E-mail: ^arkpotapova@yandex.ru, ^btes_mtusi@mail.ru, ^cvolikpotapov@gmail.com

The systems of artificial intelligence with speech communication elements are usually designed in the assumption that the communication should occur through written words. However, this is not always convenient and, in many cases, quite inefficient. It was found that, for a human user, the most convenient and natural way of communication is realized through speech. By using the spoken language, the user makes less mistakes, becomes less tired, and is capable of a faster response, while the communication rate in this case is considerably higher than in other types of communication (visual, tactile, or tonal).

PACS: 43.72+q

Keywords: speech synthesis, text analysis rules, segmental program, suprasegmental (prosodic) program.

Received 07 July 2017.

Сведения об авторах

1. Потапова Родмонга Кондратьевна — доктор фил. наук, профессор, академик Международной академии информатизации, директор Института прикладной и математической лингвистики; тел.: (495) 637-56-97, e-mail: RKPotapova@yandex.ru.
2. Санников Владимир Григорьевич — канд. техн. наук, доцент, профессор; e-mail: tes_mtusi@mail.ru.
3. Потапов Всеволод Викторович — доктор фил. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: volikpotapov@gmail.com.