

МЕТОД МОДЕЛИРОВАНИЯ СИНТЕЗАТОРОВ ЗВУКОВЫХ СИГНАЛОВ

Н.В. Горячев¹, Г.Г. Рогозинский^{2,3*}

¹АО «Научно-производственное предприятие «Радар ММС»
Санкт-Петербург, 197375, Российская Федерация

²Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича,
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

³ИПТ РАН им. Соломенко,
Санкт-Петербург, 199178, Российская Федерация

*Адрес для переписки: gleb.rogozinsky@gmail.com

Информация о статье

УДК 519.876.5

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Горячев Н.В., Рогозинский Г.Г. Метод моделирования синтезаторов звуковых сигналов // Труды учебных заведений связи. 2019. Т. 5. № 1. С. 25–30. DOI:10.31854/1813-324X-2019-5-1-25-30

Аннотация: В статье рассматривается предложенный авторами метод моделирования аппаратных систем синтеза и обработки звука на примере синтезатора Yamaha TX81Z, использующего синтез звука на основе частотной модуляции (FM-синтез). Для программного моделирования используется специализированный язык Csound. Приводятся основы FM-синтеза, описание метода моделирования устройств синтеза звука, анализ результатов, полученных при моделировании.

Ключевые слова: системы синтеза звука, моделирование, языки компьютерной музыки, Csound, FM-синтез.

Введение

Широкое развитие программных средств синтеза и обработки звука в значительной мере способствовало сокращению количества аппаратных устройств, используемых в составе студийных и концертных комплексов звукотехнического оборудования. Заметный прогресс в области компьютерного звука обеспечил программные реализации, превосходящие свои аппаратные аналоги как в области качества звучания, так и по функциональным возможностям.

В то же время область электронной и компьютерной музыки непосредственным образом затрагивает ряд творческо-эстетических факторов. В культурологической плоскости имеет существенное значение тембрика, характерная той или иной эпохе электронной музыки. В этой связи актуальными являются вопросы сохранения соответствующих электромузыкальных инструментов и/или их точное моделирование с помощью алгоритмов компьютерного синтеза.

80-е и 90-е годы XX века имели определяющее значение для современного тембрального ландшафта электронной музыки. Именно в эти два десятилетия было выпущено значительное количество синтезаторов, звук которых определил тембральный тезаурус существующих музыкальных стилей электронной музыки. При подробной изученности одних (Yamaha DX7, Roland TB303), по-прежнему

слабо раскрыты вопросы моделирования многих других синтезаторов. В частности, среди аппаратных реализаций доминирующего в 80-е годы метода синтеза на основе частотной модуляции (FM-синтеза), помимо широко известного Yamaha DX7, следует выделить и более поздние модели, такие как TX81Z и FS1R. Первый характерен тем, что определил басовый слой для популярного в середине 90-х стиля Eurodance. Существующие сегодня программные модели не имеют широкого распространения и ставятся под сомнение специалистами. Кроме того, закрытость коммерческих программных реализаций исключает изучение алгоритмов специалистами в области компьютерной музыки и обработки звука.

Таким образом, одним из актуальных вопросов компьютерной музыки является точное (перцепционно и алгоритмически идентичное) моделирование различных устройств синтеза и обработки звука. В статье предложено решение данного вопроса на основе метода программного моделирования устройств синтеза звука, учитывающего особенности аппаратной реализации (влияние ЦАП синтезатора на форму генерируемой волны) и рассматривающего генерируемые звуковые объекты в различных плоскостях частотно-временного звукового пространства. Рассматриваемый метод может быть применен к различным устройствам, допускающим возможность получения АЧХ и других характеристик ЦАП.

1. Теоретические основы FM-синтеза

В связи с тем, что объектом моделирования является синтезатор Yamaha TX81Z, использующий метод синтеза на основе частотной модуляции (FM-синтез), ниже приводятся основные положения использования частотной модуляции для синтеза звука [1].

FM-синтез позволяет создавать разнообразные тембры, варьирующиеся от простых квазигармонических сигналов до характерного «металлического» шума [2]. Для создания консонансных звуков частота модулятора должна быть гармонически связана (находиться в кратном отношении) с несущей частотой. Некратное соотношение производит диссонансные компоненты спектра. Изменение во времени индексов модуляции позволяет получить сложные тембры, характерные для FM.

Цифровой FM-синтез был основой различных музыкальных инструментов, начиная с 1974 года.

Под простым FM-синтезом понимают ЧМ вида:

$$S_{FM}(t) = \cos(\omega_c t + B \sin \omega_m t). \quad (1)$$

Преобразование Фурье выражения (1) дает:

$$F(S_{FM}(t)) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(B) \cos(\omega_c + n\omega_m)t, \quad (2)$$

где $J_n(B)$ – функции Бесселя 1-го рода – решения дифференциального уравнения Бесселя, конечные в точке $x = 0$ при целых и неотрицательных n .

Амплитуды спектральных составляющих изменяются соответственно функциям Бесселя. Их значения близки к нулю, пока индекс модуляции (B) не будет равен порядку (n), затем они имеют резкий скачок и ослабевают подобно синусоиде, затухающей пропорционально $1/x^{1/2}$ (рисунок 1).

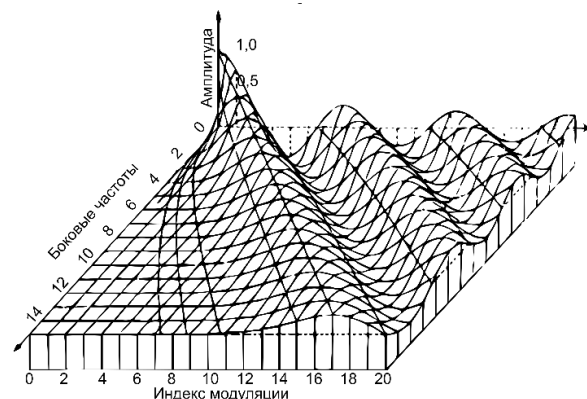


Рис. 1. Зависимость амплитуд спектральных составляющих от индекса модуляции

С увеличением индекса модуляции энергия спектра перераспределяется в сторону боковых полос, что на слух воспринимается как повышение яркости тембра. На рисунке 2 приведены графики спектра для индексов модуляции 1, 2 и 3.

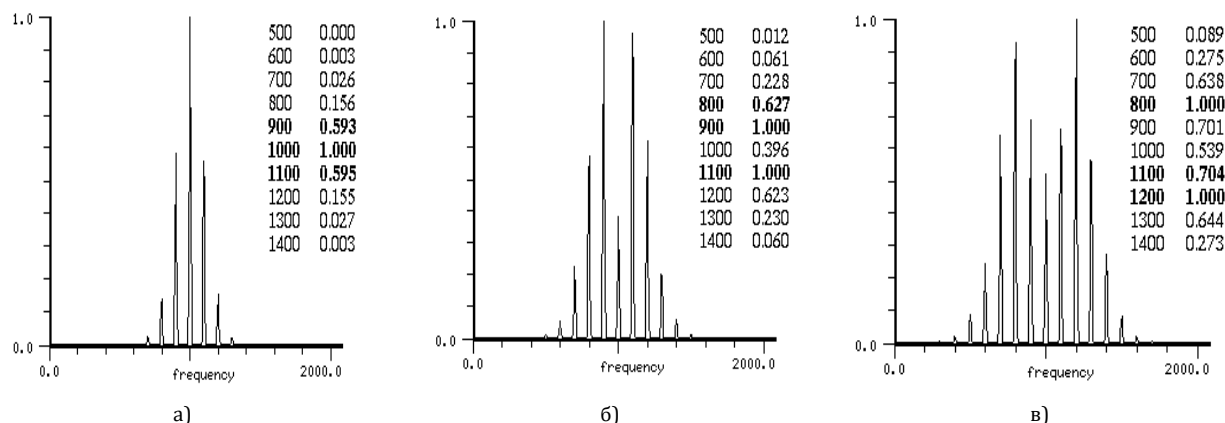


Рис. 2. Спектры FM-сигналов для несущей частоты 1000 Гц, частоты модуляции 100 Гц для индексов модуляции 1 (а), 2 (б) и 3 (в)

2. Основные аппаратные и программные реализации FM-синтеза

Алгоритм цифрового FM-синтеза впервые был предложен Д. Чоунингом в Стэнфордском университете в 1967–1968 годах, лицензирован японской компанией Yamaha в 1973 году [1, 3].

Наиболее известной аппаратной реализацией FM-синтеза является синтезатор Yamaha DX7, выпущенный в 1983 году. Yamaha остановила выпуск аппаратных FM-синтезаторов в начале 90-х в связи

с переходом на производство многофункциональных рабочих станций. В настоящее время FM-синтез в основном реализуется в программных синтезаторах, таких, как Native Instruments FM7/FM8, Image-Line Sytrus и др. В то же время практически любой современный синтезатор имеет возможность частотной модуляции между парой генераторов. Таблица 1 содержит сводную информацию об основных FM-синтезаторах в хронологическом порядке.

ТАБЛИЦА 1. Основные аппаратные и программные реализации FM-синтеза

Название / год выпуска	Исполнение	Операторы / Алгоритмы	Волноформы	Интерфейсы	Совместимость
Yamaha DX7 (1983) Yamaha DX7-II (1987)	Аппаратная модель, 61 клавиша	6 OPs / 32 ALGs	Синус	MIDI IN/OUT/THRU	–
Yamaha TX81Z (1987)	Аппаратная модель, 1U	4 OPs / 8 ALGs	8 форм	MIDI IN/OUT/THRU	–
Yamaha FS1R (1998)	Аппаратная модель, 1U	8 OPs / 88 ALGs	8 форм	MIDI IN/OUT/THRU	–
NI FM8 (2006)	Программный плагин	6 OPs / произв.*	32 формы	VST/AU/AAX	DX7, DX7-II, DX11, TX81Z, DX21, DX27, DX100
Image-Line Sytrus (2008)	Программный плагин для FL Studio	6 OPs / произв.*	Без огр.	ReWire, MIDI	–
asb2m10 Dexed (2016)	Программный плагин	6 OPs / 32 ALGs	Синус	VST/AU/LV2	DX7
Hexter (2004)	Программный плагин	6 OPs / 32 ALGs	Синус	DSSI	DX7
Arturia DX7 V	Программный плагин	6 OPs / 32 ALGs	25 форм	VST/AU/AAX	DX7
LoftSoft FMHeaven (2004)	Программный плагин	6 OPs / произв.*	16 форм	VST	DX7, TX81Z
Oxe FM Synth (2004)	Программный плагин	6 OPs / произв.*	6 форм	VST	–
DXi FM (2011)	Приложение для iPad	4 OPs / 8 ALGs	12 форм	CoreMIDI, AudioBus	–
KQ Dixie (2018)	Приложение для iPad	6 OPs / 32 ALGs	Синус	AU, CoreMIDI, Audio-bus	DX7
Primal Audio FM4 (2014)	Приложение для iPad	4 OPs / 8 ALGs	8 форм	Inter-APP, MIDI, AudioBus	–
Yamaha reface DX (2015)	Аппаратный синтезатор, 37 клавиш	4 OPs / 12 ALGs	Синус	USB MIDI	–
Korg Volca FM (2015)	Аппаратный синтезатор, 15 клавиш	6 OPs / 32 ALGs	Синус	MIDI IN, SINC	DX7

*произв. – произвольный алгоритм

Из таблицы вынесены бюджетные аналоги DX7 – DX9, DX21, DX27, DX100, FB-01, а также соответствующие рэкковые версии – TX7, TX802. Произвольное количество алгоритмов означает возможность свободной коммутации между любыми операторами.

Из таблицы видно, что большинство представленных в ней реализаций направлено на воссоздание качеств Yamaha DX7, что подтверждает обозначенный выше тезис об актуальности разработки моделей других устройств. Значительная часть существующих программных моделей использует закрытый код. Среди существующих программных моделей DX7 с открытым кодом наиболее широко известна модель Рассела Пинкстона, опубликованная в Csound Book [6]. При высокой алгоритмической точности, модель не учитывает АЦП, зеркальные искажения и шумы квантования. Кроме того, для данной модели не выполнялось определение соответствий между параметрами моделируемого синтезатора Yamaha (которые носят абстрактный характер и задаются в диапазоне от 0 до 99) и реальными значениями той или иной величины.

3. Метод моделирования

В «классическом» варианте компьютерного синтеза звука, процесс формирования любого тембра можно разделить на следующие обобщенные этапы: генерация звуковой основы, манипуляция исходными элементами для формирования основного тембра, дополнительная обработка, включающая в себя различные эффекты.

Например, в простейшей модели субтрактивного синтеза звука первый этап включает в себя генерацию полигармонических волноформ, как правило – пилообразных или прямоугольных, второй – их сумму, различные виды модуляции, обеспечивающие формирование амплитудных и частотных огибающих, низкочастотных модуляторов (LFO, *от англ.* Low Frequency Oscillator) для получения тремоло и вибрато, а также блок частотных фильтров, за счет которого формируется требуемый спектральный образ звукового объекта. Финальный этап включает в себя различную обработку – дилэй, ревербератор, хорус/фейзер/фланжер и т. д. Трехкомпонентная модель формирования тембра показана на рисунке 3.

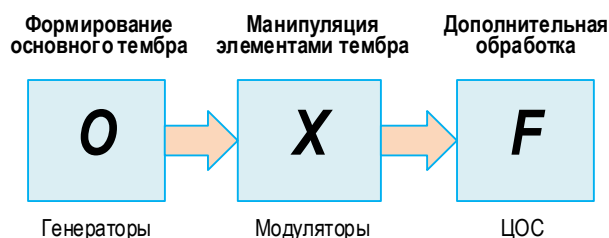


Рис. 3. Трехкомпонентная модель формирования тембра

Как правило, дополнительная обработка рассматривается как побочный элемент синтеза звука. Следует также отметить, что зачастую именно обработка эффектами способна сделать звук уникальным и, в некоторых случаях, она обуславливает хорошую идентифицируемость тембра.

Следовательно, мы можем установить степень подобия одного тембрального пространства другому и, тем самым сократить или обобщить описание, «расслоив» тезаурус тембра на три компоненты:

$$\langle T \rangle^{\xi^T} = \langle T \rangle^{\xi^{T_0}} \cup \langle T \rangle^{\xi^{T_X}} \cup \langle T \rangle^{\xi^{T_F}} = \langle T \rangle^{\xi^{T_0 + \xi^{T_X} + \xi^{T_F}}}, \quad (4)$$

где ξ^{T_0} – тезаурус формирования основного тембра;

ξ^{T_X} – тезаурус манипуляции элементами;

ξ^{T_F} – тезаурус дополнительной обработки.

Критерием подобия одного тембрального пространства другому может служить степень принадлежности, определяемая схожестью каждого из трех тезаурусов. Таким образом, тезаурусы блоков X и F находятся в зависимости от тезауруса блока O (см. рисунок 3). При неверном моделировании тезауруса, определяющего формирование тембрального ядра синтезатора, все дальнейшие операции лишены смысла.

4. Описание объекта моделирования

Синтезатор Yamaha TX81Z (1987) представляет собой четырехоператорный FM-синтезатор в рэк-овом исполнении [5]. Основное отличие от DX-серии заключается в возможности использовать сигналы различной волновой формы (всего используется 8 видов). Наиболее характерным и известным звуком данного синтезатора является пресет C15 Lately Bass, который можно услышать во многих танцевальных композициях ранних 90-х.

В соответствии с OXF-моделью, в начале необходимо максимально точно воссоздать массив волновых форм TX81Z. Рисунок 4 демонстрирует несоответствие между идеальной формой волны № 3 и ее реальным видом, записанным через звуковую карту с частотой дискретизации 96 кГц.

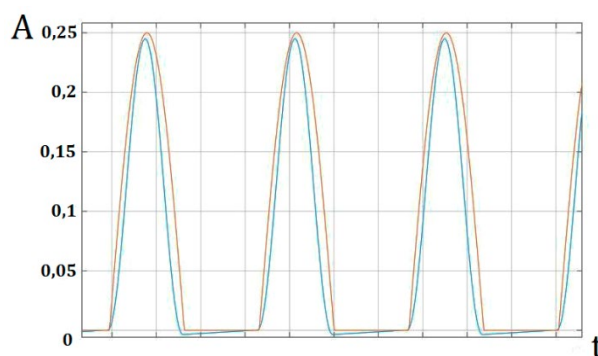


Рис. 4. Сравнение волновых форм № 3 (положительный полупериод синуса)

Данное несоответствие обусловлено нелинейностью АЧХ ЦАП оригинального синтезатора. В этой связи возникает необходимость моделирования применяемой в TX81Z ЦАП. Такая характеристика была снята в режиме генерации синусоидального сигнала (рисунок 5) и смоделирована в Filter Design Tool программы Matlab, как система из двух последовательно соединенных НЧ и ВЧ фильтров (рисунок 6).

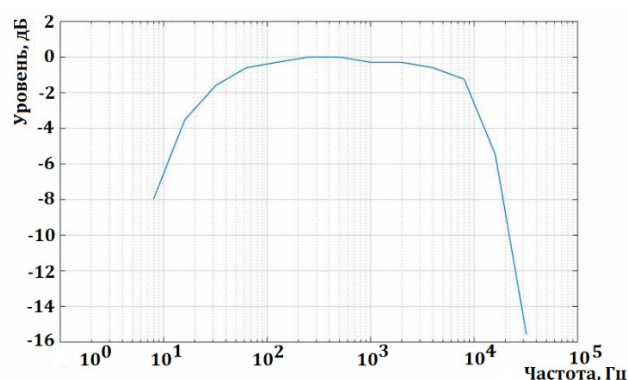
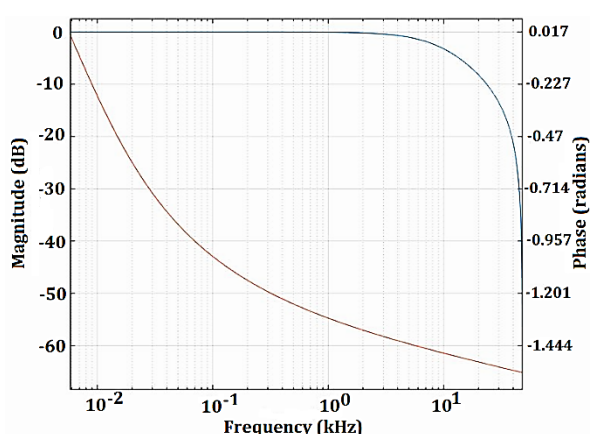
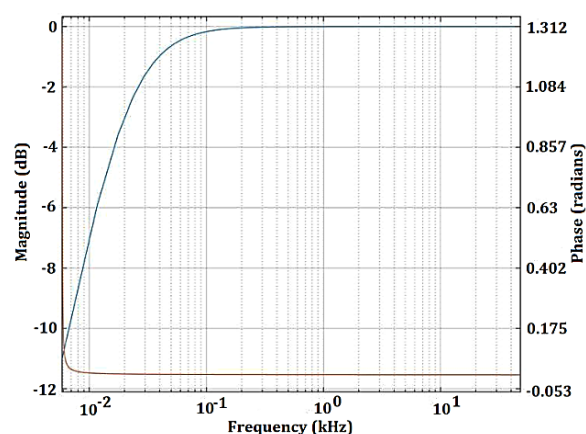


Рис. 5. АЧХ синтезатора TX81Z



а)



б)

Рис. 6. АЧХ и ФЧХ фильтров НЧ (а) и ВЧ (б)

В качестве программной среды синтеза звука в режиме реального времени был выбран Csound [6, 7], представляющий собой язык программирования, предназначенный для синтеза и обработки

звуковых сигналов. Первым шагом к построению модели является измерение параметров и характеристик синтезатора, например, параметров рас-

стройки (detune), затем решается вопрос о возможности и необходимости аппроксимации результатов. Следующим этапом моделирования является создание модели в среде Csound. Затем выполняется сравнение параметров сигналов, полученных с помощью модели, с оригинальными. Если модель не нуждается в дальнейшем уточнении, выполняется разработка соответствующего интерфейса пользователя.

Алгоритм моделирования параметра синтезатора приведен на рисунке 7.

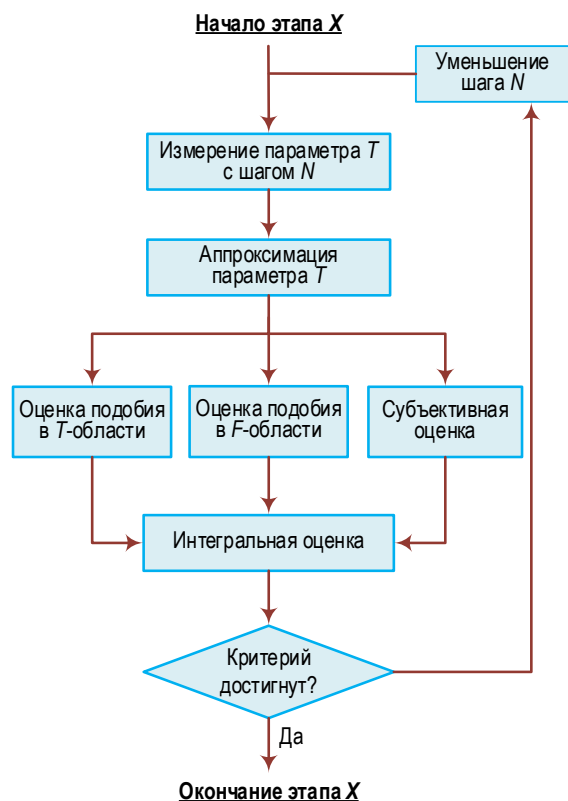


Рис. 7. Алгоритм моделирования параметра синтезатора

В силу значительного числа значений каждого параметра (в MIDI-совместимых устройствах, как правило, это $2^7 = 128$ значений) задача моделирования и дальнейшей оптимизации кода упрощается, если удастся получить аппроксимацию изменения параметра во времени. При заданном шаге N снимаются значения параметра и моделируются в программе. Промежуточные значения получаются за счет средств линейной или кубической интерполяции, встроенных в таблично-волновые генераторы Csound, что упрощает моделирование. Затем оценивается точность моделирования по промежуточным значениям. При этом рассматривается подобие во временной области (T -область), в частотной (F -область) и субъективное подобие. Несмотря на очевидное наличие корреляции между тремя перечисленными оценками подобия, нередко возможны ситуации, когда при подобии функций спектральной плотности двух сигналов, их временное

представление отличается, например, за счет разных фазовых соотношений. Кроме того, незаметные через средства визуализации особенности сигналов могут оказаться различимыми аудиально. Таким образом, важна интегральная оценка степени подобия оригинального и синтезируемого сигналов.

На данный момент в модели реализована генерация всех оригинальных форм волн. Так же реализована генерация огибающей и модель коммутации операторов. На рисунке 8 приведены результаты сравнения оригинальных волновых форм с модельными в частотной области.

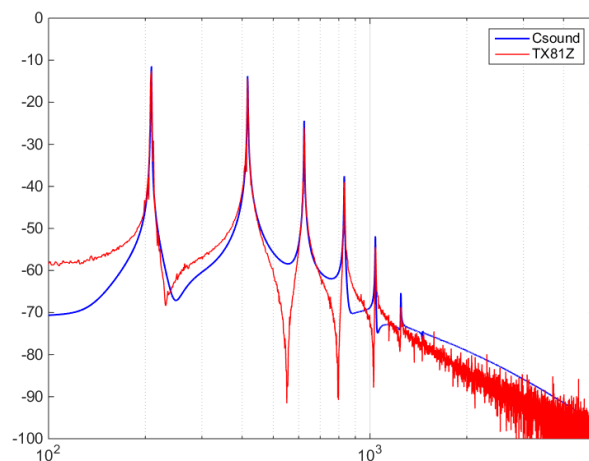


Рис. 8. Результаты сравнения оригинальной и модельной волновых форм в частотной области для двухоператорной модели

Заключение

Полученный метод может быть применен для моделирования различных аппаратных устройств синтеза и обработки звука. Отсутствие точных программных моделей аппаратных синтезаторов определяет целесообразность продолжения подобных исследований. Метод сможет оказаться особенно востребованным для моделирования цифровых синтезаторов – как ранних сэмплеров и FM-синтезаторов 80-х годов, так и virtual analog устройств конца 90-х. Результаты работы одного из авторов данной статьи в части моделирования модульного синтезатора Clavia Nord Modular G2 изложены в [9, 10]. На следующем этапе работ планируется реализовать чтение оригинальных пресетов TX81Z в MIDI SysEx-формате [8], разработать пользовательский интерфейс и провести субъективную оценку точности моделирования. Основным критерием подобия будет являться схожесть с пресетом C15 Lately Bass, так как именно этот звук является наиболее характерным для моделируемого синтезатора. Генерация данного звука требует двухуровневой модуляции с использованием различных огибающих, самомодуляции оператора четырех и двух различных волновых форм (1 и 5), что свидетельствует о сложности данного звука и позволяет использовать его при оценке точности моделирования.

Список используемых источников

1. Roads C. *The Computer Music Tutorial*. Cambridge, MA: MIT Press, 1996. 1234 p.
2. Chowning J.M. The Synthesis of Complex Audio Spectra by Means of Frequency Modulation // *The Journal of the Audio Engineering Society*. 1973. Vol. 21. Iss. 7. PP. 526–534.
3. Chowning J., Bristow D. *FM Theory & Applications by musicians for musicians*. Tokyo: Yamaha Music Foundation, 1986. 194 p.
4. Рогозинский Г.Г., Сотников А.Д. Тембральные пространства в задачах сонификации киберфизических систем // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2018. № 2. С. 89–99. DOI:10.24411/2218-130X-2018-00028
5. Yamaha FM Tone Generator TX81Z. Owner's manual.
6. Boulanger R. *The Csound Book: Perspectives in Software Synthesis, Sound Design, Signal Processing, and Programming*. Cambridge, MA: MIT Press, 2000. 782 p.
7. Lazzarini V., Yi S., Ffitch J., Heintz J., Brandtsegg Ø., McCurdy I. *Csound: A Sound and Music Computing System*. Cham: Springer, 2016. 516 p.
8. The MIDI 1.0 Specification V96.1, Second Edition. The MIDI Manufacturers Association, Los Angeles, 2001. 334 p.

* * *

MODELING METHOD OF HARDWARE SOUND SYNTHESIZERS

N. Goryachev¹, G. Rogozinsky^{2,3}

¹JSC «Radar MMS»,
St. Petersburg, 197375, Russian Federation

²The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

³Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences,
St. Petersburg, 199178, Russian Federation

Article info

Article in Russian

For citation: Goryachev N., Rogozinsky G. Modeling Method of Hardware Sound Synthesizers. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2019;5(1):25–30. (in Russ.) Available from: <https://doi.org/10.31854/1813-324X-2019-5-1-25-30>

Abstract: *The paper presents author's original method of hardware synthesizers and sound processing devices modeling, taking the Yamaha TX81Z FM synthesizer as an example. The computer music language called Csound is used for the software simulation. The paper gives the basis of FM synthesis theory, the review of modeling method, and analysis of modeling results.*

Keywords: *sound synthesis systems, modeling, computer music languages, Csound, FM synthesis.*

References

1. Roads C. *The Computer Music Tutorial*. Cambridge, MA: MIT Press; 1996. 1234 p.
2. Chowning J.M. The Synthesis of Complex Audio Spectra by Means of Frequency Modulation. *The Journal of the Audio Engineering Society*. 1973;21(7):526–534.
3. Chowning J., Bristow D. *FM Theory & Applications by musicians for musicians*. Tokyo: Yamaha Music Foundation; 1986. 194 p.
4. Rogozinsky G.G., Sotnikov A.D. Timbral Spaces for Sonification of Cyber-Physical Systems. *Vestnik Sankt-Petersburgskogo universiteta GPS MCHS Rossii*. 2018;2:89–99. (in Russ.) Available from: <https://doi.org/10.24411/2218-130X-2018-00028>
5. Yamaha FM Tone Generator TX81Z. Owner's manual.
6. Boulanger R. *The Csound Book: Perspectives in Software Synthesis, Sound Design, Signal Processing, and Programming*. Cambridge, MA: MIT Press; 2000. 782 p.
7. Lazzarini V., Yi S., Ffitch J., Heintz J., Brandtsegg Ø., McCurdy I. *Csound: A Sound and Music Computing System*. Cham: Springer; 2016. 516 p.
8. The MIDI 1.0 Specification V96.1, Second Edition. The MIDI Manufacturers Association, Los Angeles, 2001. 334 p.