



---

ПРОБЛЕМЫ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

---

Р. Х. ЗАРИПОВ

# МАШИННЫЙ ПОИСК ВАРИАНТОВ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ТВОРЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Под редакцией и с дополнением  
М. Г. ГАЗЕ-РАПОПОРТА



МОСКВА «НАУКА»  
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ  
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ  
1983

**32.81**

**3-34**

**УДК 62-50**

**Машинный поиск вариантов при моделировании творческого процесса.**  
**Зарипов Р.Х.— М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983.— 232 с.**

Книга посвящена одной из наиболее важных проблем психологии мышления и построения искусственного интеллекта — проблеме трансцендирования, т. е. переноса инвариантной структуры (носителя некоторого образа) при варьировании ситуаций. Этот перенос является необходимым компонентом творческой деятельности во всех сферах ее проявления. Рассматриваются принципы варьирования ситуаций и моделирования творчества на ЭВМ. На их основе построен машинный алгоритм, порождающий мелодические вариации на заданную музыкальную тему. Вариации рассматриваются также на примере плетения кружев и комбинаторных игр.

Табл. 17, илл. 76, библ. 110 назв.

*Рудольф Хафизович Зарипов*

**МАШИННЫЙ ПОИСК ВАРИАНТОВ  
ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ТВОРЧЕСКОГО ПРОЦЕССА**

(Серия: «Проблемы искусственного интеллекта»)

Редактор *Н. А. Райская*

Технический редактор *В. Н. Кондакова*

Корректоры *Г. В. Подволысская, Т. С. Вайсберг*

ИБ № 12039

Сдано в набор 11.08.82. Подписано к печати 22.03.83. Т-06975. Формат 60×90<sup>1/16</sup>.  
Бумага тип. № 3. Обыкновенная гарнитура. Высокая печать. Условн. печ. л. 14,5.  
Уч.-изд. л. 15,59. Тираж 7000 экз. Заказ № 294. Цена 1 р. 70 к.

Издательство «Наука». Главная редакция физико-математической литературы.  
117071, Москва, В-71, Ленинский проспект, 15

4-я типография издательства «Наука». 630077, Новосибирск, 77, Станиславского, 25

**3 1502000000—067 193-83  
053(02)-83**



Издательство «Наука»,  
Главная редакция  
физико-математической литературы,  
1983

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Предисловие . . . . .</b>	<b>5</b>
<b>Введение . . . . .</b>	<b>9</b>
<b>Г л а в а 1. Восприятие варьированных ситуаций . . . . .</b>	<b>15</b>
§ 1.1. Варьирование ситуации . . . . .	15
§ 1.2. Перенос и маскировка инвариантов . . . . .	18
§ 1.3. Свойства варьированных ситуаций . . . . .	24
<b>Г л а в а 2. Моделирование — метод исследования творчества . . . . .</b>	<b>31</b>
§ 2.1. Моделирование на вычислительной машине . . . . .	31
§ 2.2. Три этапа моделирования . . . . .	34
§ 2.3. Синтезирование — частный случай моделирования . . . . .	43
§ 2.4. Трудности моделирования творческой деятельности . . . . .	47
§ 2.5. Иерархичность структуры . . . . .	51
§ 2.6. Переход от слабой модели к сильной . . . . .	64
§ 2.7. Марковские цепи в машинной музыке . . . . .	66
<b>Г л а в а 3. Анализ мелодий и их вариаций . . . . .</b>	<b>80</b>
§ 3.1. Музыка как объект исследования . . . . .	80
§ 3.2. Строение мелодии . . . . .	84
§ 3.3. Вариационное развитие мелодии и заимствование музыкальных тем . . . . .	92
§ 3.4. Принципы варьирования мелодии . . . . .	103
<b>Г л а в а 4. Имитационное моделирование на вычислительной машине . . . . .</b>	<b>110</b>
§ 4.1. Вероятностный алгоритм и модель творчества . . . . .	110
§ 4.2. Постоянные и переменные параметры алгоритма . . . . .	113
§ 4.3. Иерархический принцип строения алгоритма . . . . .	116
§ 4.4. Особенности метода моделирования музыкальных композиций . . . . .	120
§ 4.5. Постановка (конкретизация) цели . . . . .	125
<b>Г л а в а 5. Сочинение мелодических вариаций на вычислительной машине . . . . .</b>	<b>128</b>
§ 5.1. Элементы мелодии и их кодирование . . . . .	128
§ 5.2. Основные принципы варьирования мелодии. Элементарные преобразования . . . . .	141
§ 5.3. Некоторые результаты программной реализации варьирования мелодий . . . . .	157
§ 5.4. Синтез мелодии как средство для ее анализа . . . . .	166
<b>Г л а в а 6. Вариации в комбинаторной игре . . . . .</b>	<b>178</b>
§ 6.1. Игра в 5.— инструмент при исследовании эвристической деятельности . . . . .	178
§ 6.2. Правила игры . . . . .	180
§ 6.3. Анализ решений. Приемы решения . . . . .	181

§ 6.4. Структура решения задачи . . . . .	188
§ 6.5. Разрешимость игры в 5 . . . . .	191
§ 6.6. Классификация разрешимых задач . . . . .	194
§ 6.7. Варьированные ситуации . . . . .	198
<b>Г л а в а 7. Аналогии и варьированные ситуации . . . . .</b>	<b>203</b>
§ 7.1. Инвариантные структуры в разных объектах исследования . . . . .	203
§ 7.2. Об алгоритмическом характере поведения слушателя и сочинителя музыки . . . . .	209
<b>Д о п о л н е н и е. М. Г. Гаазе-Рапопорт. Поиск вариантов в сочинении сказок . . . . .</b>	<b>213</b>
§ Д.1. Общая структура волшебной сказки . . . . .	213
§ Д.2. Элементы структуры волшебной сказки . . . . .	217
§ Д.3. Структура алгоритма порождения сказки . . . . .	221
<b>Словарь музыкальных терминов . . . . .</b>	<b>224</b>
<b>Л и т е р а т у р а . . . . .</b>	<b>226</b>
<b>И м е н н ы й у к а з а т е л ь . . . . .</b>	<b>230</b>
<b>П�едметный указатель . . . . .</b>	<b>231</b>

---

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Книга, которую вам предстоит прочитать, не совсем обычна. Впрочем, это неудивительно, ибо написана она о том, что одновременно принадлежит и психологии творческой деятельности, и кибернетике, и искусствоведению. Наше время — период бурного развития вот таких «ничейных областей», находящихся на границах нескольких наук. И то, что автор этой книги является одновременно и профессиональным математиком, и профессиональным музыкантом, и старшим научным сотрудником Института общей и педагогической психологии Академии педагогических наук СССР, вполне закономерно.

Тайны творчества волнуют человечество многие сотни лет. За это время накоплено множество фактических наблюдений, предложено немало умозрительных моделей, но тайна этого сугубо человеческого вида деятельности практически не раскрыта. Лишь в последние десятилетия, особенно после появления ЭВМ, стимулировавших модельные исследования в психологии, стало возможным всерьез говорить о таком разделе психологии, как психология творческой деятельности.

Для того чтобы содержание книги стало яснее, я позволю себе в своем предисловии остановиться на двух глобальных моделях в психологии творческой деятельности: каждая из них играет важную роль в исследованиях, которым посвятил себя Р. Х. Зарипов.

Первая из этих моделей родилась еще в начале нашего века. Автором ее считается Э. Торндайк. Наблюдая за процессами обучения крыс при прохождении пути в лабиринтах различной структуры, от начальной площадки до площадки, на которой находилась приманка, Торндайк сформулировал общую гипотезу о том, что решение любой творческой задачи есть, по сути своей поиск пути в некотором лабиринте возможностей. Например, при сочинении музыкального произведения композитор на каждом шаге может выбрать альтернативные варианты продолжения его из некоторого фиксированного для него в данный момент творческого процесса множества. Поэт, придумывающий очеред-

ную строку или строфу нового стихотворения, осуществляет аналогичный процесс альтернативного выбора. Математик, доказывающий теорему, на каждом шаге доказательства стремится сделать некоторый разумный выбор дальнейшего хода доказательства из того множества возможных шагов, которые приходят ему в это время на ум.

Так появилась лабиринтная модель мышления, в которой основной процедурой творческого процесса являлась процедура рационального отбора вариантов в заданном лабиринте возможностей. Эта модель после появления ЭВМ была использована для эвристического программирования, основой которого является целесообразная организация процедур перебора при машинном решении интеллектуальных задач. На этой основе были созданы многочисленные программы, доказывающие теоремы математической логики, шахматные и шашечные программы, первые программы для сочинения музыкальных произведений.

Но у лабиринтной модели мышления есть одна слабая сторона. Из нее никак не следует возможность формирования самого множества альтернатив, способа порождения лабиринта, в котором надо искать решение\*. Ситуация такая же, как перед скульптором, стоящим перед глыбой мрамора. Его замысел, конечно, реализуем, он как бы содержится в самой глыбе мрамора. Нужно только... отсечь все лишнее, ненужное. Но именно этого и не дает лабиринтная модель.

Новая модель в психологии творческого мышления принадлежит рано ушедшему из жизни советскому психологу В. Н. Пушкину. Суть его модели состоит в том, что всякий творческий процесс есть соотнесение структурированных описаний двух ситуаций: начальной и целевой. Другими словами, суть творчества в построении пути не в готовом, заранее заданном лабиринте, а в формировании той его части, в которой такой путь существует, причем важную роль играет то, на каком языке описаны структуры начальной и конечной ситуаций. Поясним это на двух простых примерах. Хорошо известная игра в 15 состоит в том, что на доске с 16 полями расположены 15 фишек, перенумерованных от 1 до 15. Требуется, используя свободное поле, так передвинуть фишку, чтобы получить из исходного положения некоторое заранее заданное. В этом случае начальная и конечная ситуации описаны на одном и том же языке путем указания местоположения фишек относительно полей доски. Примером другого типа могут служить шахматы. В этой игре начальная позиция описана на языке расположения шахматных фигур на полях доски (и не только начальная позиция, но и промежуточные позиции,

возникающие в процессе игры). Конечная же позиция, к которой стремится игрок, описана на другом языке, ибо его цель не привести свои фигуры в определенную позицию, а сделать мат. Конечно, матовые позиции могут быть теоретически описаны как расположения фигур на доске, но практически это невозможно сделать.

Именно поэтому модель, предложенная В. Н. Пушкиным и исследованная им и его учениками и сотрудниками (среди них и автором настоящей книги), часто называется *семиотической*. Это название подчеркивает важность этапа описания и структурирования ситуаций и соотнесения описаний между собой.

При машинном сочинении музыки Р. Х. Зарипов использовал обе модели творческой деятельности. Читатель легко обнаружит это при описании программ, примененных при варьировании мелодий и синтезировании их.

Сейчас предполагается, что основу творческой деятельности человека составляют некоторые глобальные процедуры, не ориентированные на какую-либо конкретную деятельность, а присущие любой из них. Примерами их могут служить процедура альтернативного выбора из множества имеющихся вариантов и процедура установления связей между описаниями начальной и целевой ситуаций, о которых мы уже сказали. Другими примерами глобальных процедур являются процедуры выделения классифицирующей структуры (или, как принято теперь говорить, *фрейма*), позволяющего относить ситуацию к тому или иному классу ситуаций, процедура обобщения описаний, процедура прогнозирования и ряд других.

В книге Р. Х. Зарипова впервые рассматривается глобальная процедура, названная автором *процедурой варьирования* или *процедурой трансформации*. Суть ее состоит в преобразовании описания ситуации с сохранением некоторого ее инварианта (или в терминологии специалистов в области искусственного интеллекта — *фрейма-классификатора*). С помощью подобного преобразования удается создавать новые художественные произведения или научные результаты на основании уже созданных ранее произведений или научных достижений. Как правило, трансформация происходит неосознанно, и человек не фиксирует на этой процедуре свое внимание. Так возникают неосознанные подражания в поэзии и беллетристике, заимствования в музыке и живописи, переформулировки в научных результатах.

Процедура варьирования тесно связана с тем, что мы обычно называем рассуждениями по аналогии, ассоциативным мышлением, навязыванием некоторого ритма или темы. Заслуга автора книги состоит в том, что он сумел на при-

мере музыкального творчества и ряде других примеров творческой деятельности человека описать суть процедуры варьирования и ее значение в процессе творчества.

Машинная имитация в руках автора превратилась в тот инструмент, с помощью которого ему удалось вскрыть сущность трансформации описаний ситуаций, формализовать соответствующую процедуру и объяснить многие феномены, присущие творческой деятельности человека.

Заканчивая это предисловие, я хотел бы несколько слов сказать о титульном редакторе книги Модесте Георгиевиче Гаазе-Рапопорте. Имя его хорошо известно всем специалистам, работающим в области кибернетики. (Вместе с А. А. Ляпуновым, М. Л. Цетлиным, М. М. Бонгардом, Н. А. Криницким, И. А. Полетаевым он стоял у истоков развития этой науки в СССР.) Я имел возможность оценить эту работу в качестве редактора рукописи Р. Х. Зарипова. Их совместный труд по улучшению и обогащению рукописи сделал их, по существу, соавторами этой интересной и оригинальной работы.

*Д. А. Постелов*

---

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из существенных элементов процесса творчества является процедура *транспонирования* (*переноса*) некоторой структуры из одной ситуации в другую. Исследованию закономерностей таких переносов и их места в общем процессе творчества, а также изучению методов формирования возникающих при этом вариантов и способов их оценки и посвящена настоящая книга.

Проблема транспонирования — одна из наиболее важных проблем *психологии мышления*, *психологии восприятия*. Мысление, как известно, нераэривно связано с чувственным познанием (ощущениями, восприятиями) как основным источником знаний о мире. Проблемы мышления неотделимы от восприятия исследуемых явлений — отражения в мозге человека предмета в целом или характеризующих его особенностей. В процессе мышления или восприятия часто происходит перенос идей (образов, ассоциаций) из других областей знания. Однако, как правило, он осуществляется подсознательно, интуитивно. Невозможность непосредственного наблюдения процессов мышления и, в частности, механизмов интуиции не позволяет «в лоб» решать поставленную проблему и приводит к весьма серьезным трудностям.

Восприятие характеризуется такой качественной особенностью, как *структурность*. Структура — целостная и неразложимая на составляющие части — носитель некоторого образа, или *гештальта*. Возможность перенесения структуры из одной ситуации в другую, в новые условия, или *транспонируемость*, является фундаментальным свойством структуры.

Если каким-либо образом изменить элементы, образующие некоторый объект или ситуацию, а структуру оставить неизменной, то полученный (преобразованный) объект будет отличаться от исходного, но в силу неизменности структуры, перенесенной из начальной ситуации, он будет сохранять некоторые свойства исходного объекта или ситуации.

Одним из методов изучения мышления является *варьирование ситуаций*. При изменении некоторой первоначальной ситуации получается варьированная ситуация, но при восприятии исходной и варьированной ситуаций обнаруживается их известная общность. Эта общность в восприятии отличающихся, но в неко-

тором смысле близких ситуаций наглядно проявляется, например, в таких видах интуитивной деятельности, как подражание, узнавание или распознавание образов, а также при обучении. Наряду с новым здесь ощущается ценообразованная связь с первоначальной ситуацией, элемент повторяемости, постоянства. Это обстоятельство связано с наличием *инвариантов* преобразования — таких элементов ситуации, которые остаются неизменными, постоянными при любой трансформации, т. е. того, что обычно называют структурой. Иначе говоря, при варьировании происходит перенос определенных отношений элементов одной ситуации в другую, т. е. сохранение некоторых исходных структурных свойств.

Наличие инвариантов в варьированной и исходной ситуациях часто маскируется другими элементами, которые как бы меняют лицо первоначальной ситуации. Это *трансформанты* — элементы, изменяющиеся при преобразовании. Маскирующие элементы часто до неузнаваемости трансформируют ситуацию и весьма затрудняют обнаружение инвариантов преобразования.

Выявление закономерностей переноса инвариантной структуры, сохраняющей впечатление от образа некоторого объекта, из одних условий в другие имеет существенное значение и для более общей проблемы — проблемы *искусственного интеллекта*.

Искусственный интеллект (в широком смысле слова) — это способность машины получать такие результаты, которые традиционно порождаются в процессе творческой деятельности человека. Неважно, имитируются ли при этом человеческие действия (с их психологическими и другими особенностями) или нет. Функция искусственного интеллекта не сводится к простому копированию человеческих действий; важен прежде всего конечный результат — продукт творческого процесса. Такое широкое толкование понятия искусственного интеллекта более целесообразно при теперешнем состоянии развития вычислительной техники и степени изученности процессов умственной деятельности человека.

Многие исследователи в области создания *искусственного интеллекта* пытаются дать конструктивное определение этому, еще не установившемуся научному направлению, что оказалось нелегким делом (см., например, книгу Н. Г. Загоруйко, 1975). Не останавливаясь на этом вопросе, приведем лишь своеобразное «определение», которое предложил Международный комитет по искусственному интеллекту первой Международной конференции по искусственному интеллекту (IJCAI-1, Вашингтон, 1969): «*Искусственный интеллект — это область, покрываемая названиями секций Международной конференции по искусственному интеллекту*».

Безусловно, интересен краткий перечень конкретных задач, относимых к проблеме *искусственного интеллекта*, который был составлен в 1972 г. участниками Международной фирбушской

группы (по названию места проведения Международного семинара — Фирбушпойнта, около Эдинбурга). В этот перечень вошли следующие проблемы (Н. Г. Загоруйко, 1975):

1. Создание шахматных программ.
2. Машинное творчество в области музыки, поэзии, живописи.
3. Создание программ, выдерживающих тест Тьюринга.
4. Машинное доказательство теорем.
5. Создание программ индуктивного вывода.
6. Создание вопросно-ответных систем (в том числе систем автоматического реферирования).
7. Автоматический перевод.
8. Распознавание и синтез речи.
9. Автоматическая проверка правильности программ.
10. Автоматическое вождение автомобилей.
11. Создание роботов-сборщиков, роботов-строителей.
12. Создание робота-планетохода для автономной работы в новых условиях.

В рамках проблем искусственного интеллекта изучаются, в частности, закономерности мышления и восприятия методами моделирования на электронных вычислительных машинах.

Не останавливаясь на детальном рассмотрении проблематики и содержания этого научного направления, которому посвящена в настоящее время обширная литература \*), заметим, что одна из основных проблем искусственного интеллекта — проблема понимания текста на естественном языке — тесно связана с проблемой выделения структурных инвариантов при варьировании.

Действительно, одно и то же содержание, один и тот же смысл могут быть выражены различными словами, различными, часто, казалось бы, совершенно непохожими друг на друга языковыми средствами. Поэтому проблема понимания текста, проблема искусственного выделения смысла из текста также является проблемой изучения закономерностей варьирования некоторых ситуаций (текстов), сохраняющих общий структурный инвариант — смысл.

Таким образом, рассматриваемая нами проблема тесно связана как с психологией и, в частности, с изучением творческого процесса, так и с проблематикой искусственного интеллекта,

\*) Укажем, в частности, на книгу: Управление, информация, интеллект/Под ред. А. И. Берга и др.— М.: Мысль, 1976; кроме того, упомянем некоторые издания, не вошедшие в список литературы: Труды IV Международной объединенной конференции по искусственно-му интеллекту.— М.: Изд. Научного совета по комплексной проблеме «Кибернетика» АН СССР, 1975, вып. 1—14; Материалы I и II Международных совещаний по искусственно-му интеллекту.— М.: Изд. Научного совета по комплексной проблеме «Кибернетика» АН СССР, 1977 и 1980 гг.

В этих публикациях читатель найдет перечень работ, посвященных различным аспектам искусственного интеллекта.

с вопросами понимания текстов на естественном языке и искусственным (машинным) распознаванием смысла текстов на этом языке.

В качестве основного метода для изучения транспонируемости, т. е. сохранения инвариантности структурных свойств при изменении объекта творчества, в настоящей работе используется метод моделирования на ЭВМ, разработанный автором для исследования некоторых функций композитора и музыковеда (Р. Х. Зарипов, 1971а).

Моделирование — это метод исследования, заключающийся в искусственном воспроизведении интересующих исследователя свойств и особенностей объекта исследования. Такое воспроизведение часто позволяет глубже осознать эти свойства объекта, установить ранее неизвестные связи и отношения между ними. Моделирование на ЭВМ является объективным (межличностным) формальным средством проверки гипотез о закономерностях исследуемого процесса или явления. При этом анализ машинных результатов моделирования позволяет оценить степень изученности моделируемого объекта или процесса, правильность принципов, положенных в основу моделирования, а также качество алгоритма моделирования (применимость допущений, принятых при формализации описания объекта моделирования).

Всякое моделирование с использованием ЭВМ требует разработки программы, т. е. предварительной алгоритмизации моделируемого процесса. Здесь речь идет об алгоритмах в математическом смысле этого слова, представляющих собой зафиксированные в виде программы последовательности четких процедур, причем мы допускаем возможность включения в программу некоторого элемента, имитирующего случайный выбор, — датчика случайных чисел. Таким образом, в настоящей работе мы имеем дело с вероятностными алгоритмами и их машинными реализациями.

Несмотря на значительное число работ, посвященных различным аспектам моделирования творческих процессов, многие считают, что процессы творчества, интуиция, инсайт, часто реализуемые неосознанно, спонтанно, «под влиянием внутренних стимулов», принципиально не поддаются алгоритмизации и, следовательно, моделированию.

Мы не придерживаемся этих крайних позиций и считаем, что подавляющее большинство элементов творческой деятельности, реализуемых человеком «легко и просто», «не думая», «по интуиции», на самом деле являются неосознанной реализацией определенных алгоритмизируемых закономерностей, реализацией неосознаваемых, но объективно существующих и формализуемых критериев красоты и вкуса.

Не пытаясь решать вопрос о полноте такого подхода и не пытаясь рассматривать процессы творчества во всех их взаимосвя-

зях с духовной и социальной деятельностью человека, мы хотим показать на ряде конкретных примеров, что значительная часть интуитивных актов, составляющих творческий процесс, представляет собой неосознанное или не вполне осознанное использование повторяющихся алгоритмизируемых процедур. Такой процедурой — на наш взгляд, она занимает весьма большое место в творческом процессе — является перенос некоторой фиксированной структуры при варьировании ситуации.

Проблема выявления общих закономерностей творчества и, в частности, общих закономерностей переноса (транспонирования) некоторых структур при варьировании может изучаться на объектах различной природы. В настоящей работе эти закономерности изучаются в основном на материале музыки с частичным использованием других видов творческой деятельности — плетения кружев, игры в б, сочинения сказок.

Музыка — это не только способ выражения чувств, эмоций или переживаний, но и своеобразный язык мышления со своей логикой, грамматикой, структурой, со своими непреложными законами и правилами строения или организации. В музыке наглядно проявляется механизм интуиции — как при сочинении (интуиция подражания), так и при прослушивании (интуиция узнавания слуховых образов). И не секрет, что композиторы руководствуются закономерностями строения музыки, однако делают это неосознанно, интуитивно.

Все эти свойства музыки делают ее привлекательным материалом при исследовании разных сторон механизма переноса инвариантных структур, механизма гештальтирования, несмотря на фантастическую сложность этого «материала», о чем будет сказано ниже в тексте книги.

Для ознакомления со строением музыкальных сочинений, необходимого при рассмотрении метода моделирования музыкальных вариаций, ниже дается анализ мелодий. При этом мы ограничимся рассмотрением наиболее распространенного класса музыки, или музыкальной системы, а именно — традиционной тональной музыки, в рамках которой сочиняются, в частности, мелодии романсов и песен. Ознакомление будет весьма кратким — оно предназначается лишь для того, чтобы составить хотя бы какое-то представление о синтаксической структуре мелодии, о ее выразительных средствах, о некоторых сторонах и закономерностях ее строения. Более подробный анализ мелодий приводится в монографии автора «Кибернетика и музыка» (Р. Х. Зарипов, 1971а) на примерах популярных музыкальных произведений.

В отличие от ряда работ по моделированию на вычислительных машинах произведений искусства (см., например, Линкольн, 1970; Р. Х. Зарипов, 1971а; Ружичка, 1980), метод имитационного моделирования, описанный в настоящей книге, позволяет осознать структуру моделируемого объекта, так как машинный

результат получается вместе с перечнем характеризующих его признаков или закономерностей (значений параметров). Набор значений параметров используется в программе моделирования объекта заданного типа. Таким образом, между типом объекта и набором значений параметров устанавливается формальное соответствие, что позволяет проводить разного рода эксперименты по восприятию объекта исследования.

Эти приемы использованы при моделировании на вычислительной машине процесса варьирования некоторой заданной мелодии, иллюстрирующего явление переноса инвариантной структуры. Имитационное моделирование и разработанные автором принципы построения имитирующего алгоритма могут применяться не только для варьирования заимствованных мелодий, но и для имитирования процессов «самостоятельного» сочинения мелодий только по запрограммированным правилам и закономерностям строения композиций, когда заимствования не происходит. Ниже мы практически не будем рассматривать вопросы сочинения музыки этим способом, отсылая интересующихся к книге автора (Р. Х. Зарипов, 1971а).

Таким образом, цель настоящей работы — попытка показать, что варьирование, осуществляемое в соответствии с рассматриваемыми закономерностями, является одной из существенных составных частей творческого процесса сочинения музыки и наблюдается во всех видах художественного творчества — живописи, поэзии, литературы и др. Не всегда осознаваемое в процессе творчества, оно проявляется как подражание или перенос идей из других видов деятельности. Иначе говоря, нам представляется, что варьирование заимствованных элементов составляет общий принцип, присущий художественному творчеству и, быть может, даже любому творческому процессу вообще.

## ГЛАВА 1

# ВОСПРИЯТИЕ ВАРЬИРОВАННЫХ СИТУАЦИЙ

---

### § 1.1. Варьирование ситуации

*Инварианты, трансформанты и константы — неизменные и маскирующие элементы вариации. Сходство различных мелодий. Мелодия — классический объект психологических исследований по восприятию.*

Варьирование заданной, или первоначальной, ситуации заключается в том, что некоторые ее элементы видоизменяются, а другие остаются неизменными. В результате такого преобразования появляется варьированная ситуация, или *вариация*. При восприятии и сравнении между собой первоначальной и варьированной ситуаций обнаруживается, что неизменные элементы, или *инварианты* преобразования, создают впечатление некоторой общности или сходства обеих ситуаций, а видоизмененные элементы, *трансформанты*, напротив, отдаляют одну ситуацию от другой, как бы маскируя наличие в ней инвариантов.

Поясним сказанное на музыкальном примере. Вспомним какую-нибудь песню. Ее мелодию можно сыграть на разных музыкальных инструментах — скрипке, балалайке или кларнете, которые дают звуки различного тембра, различной звуковой окраски; ее можно сыграть и на одном инструменте — например на виолончели, но в разных регистрах (выше или ниже по высоте звука, например, на разных струнах). Песню можно пропеть разными голосами — высоким сопрано или низким басом — это дает и звуки разного тембра, и разные регистры. В таких различных исполнениях одной и той же мелодии каждый раз все звуки, составляющие данную мелодию, будут отличаться и по тембру, и по высоте, и по громкости, и, может быть, по темпу исполнения.

Однако при всем разнообразии и различии звуков, составляющих мелодию песни, слушая разные исполнения ее, мы воспринимаем (как это ни поразительно!) *одну и ту же мелодию*. Так, мы безошибочно узнаем мелодию «Песни о встречном» Д. Шостаковича независимо от того, исполняет ли ее симфонический оркестр, поет ли бас или женский хор, играют ли на ксилофоне или на тромbone. На рис. 1.1 видно, что мелодии А и Б — это разные последовательности нот: вторая получена из первой путем транспонирования — переноса всех ее нот на три ступени вверх. Однако при их проигрывании мы неизменно слышим *одну и ту же мелодию*.

Секрет в том, что эти разные последовательности звуков объединяет одно общее их качество — у них одна и та же последовательность звуковысотных интервалов между соседними нотами. Если каждый интервал выразить числом полутонов, то такую последовательность можно записать в таком виде (знак — показывает движение текущей ноты вниз относительно непосредственно предшествующей ей ноты, отсутствие знака перед интервалом — движение текущей ноты вверх):

0, 2, -2, -2, -1, -2, -2, -5, 0, 5, 2, 2, 1, -1, -2, 5.

Именно эта последовательность интервалов и способствует восприятию одной и той же мелодии при прослушивании разных

Рис. 1.1. Фрагмент «Песни о встречном» Д. Шостаковича. Мелодия Б — транспонированная в другую тональность мелодия А.

последовательностей нот. Она неизменна, или инвариантна, при различных исполнениях (а также при восприятии различных исполнений) одной и той же мелодии — на разных инструментах, в разных темпах, в разных регистрах.

Однако к одной лишь неизменной последовательности интервалов не сводится та инвариантная структура, которая служит носителем образа мелодии. Такая структура в нашем примере состоит из двух инвариантов — последовательности интервалов и ритма. Если разложить ее на составляющие части — ритм и последовательность интервалов, то взятая в отдельности каждая часть, являясь инвариантом, тем не менее может и не бытьносителем первоначального образа.

Покажем это на примере той же мелодии «Песни о встречном». Для этого, сохранив последовательность интервалов исходной мелодии (мы даже сохраним и последовательность высот звуков — еще один дополнительный инвариант мелодии), изменим ее ритм, точнее — метрические акценты. Заметим, что здесь более существенно не столько изменение ритма, сколько изменение метрических акцентов — способа соответствия высот различным (сильным или слабым) долям такта. Простой пример двухнотной метрической фигуры с разными акцентами: сильная — слабая и слабая — сильная, что соответствует в стихосложении двухсложной стопе с ударением на первом слоге (хорей) и на втором слоге (ямб).

На рис. 1.2 в строке 1 приведена мелодия Д. Шостаковича «Песни о встречном», а в строках 2 и 3 — отрывки двух других

мелодий, в которых полностью сохраняется последовательность высот из строки 1, но иные метрические акценты. И несмотря на полное совпадение звуковысотных последовательностей и, следовательно, наличие инварианта, мелодии в строках 2 и 3 совершенно непохожи на мелодию из строки 1 при их прослушивании (хотя глаз и улавливает их графическое сходство благодаря наличию инварианта — мелодической линии). В строке 2 приведен отрывок мелодии «Песни» де Фалья из «Испанской народной сюиты», а в строке 3 — отрывок мелодии народного танца. (Подобный пример приведен в гл. 3: на рис. 3.9 изображены две мелодии с одинаковой — гаммообразной — последовательностью высот, но с разными метроритмами, и мы слышим разные мелодии.)

Рис. 1.2. Мелодии с одинаковыми звуковысотными линиями и разными ритмами.

Эти примеры показывают, что не всегда тот или другой инвариант обеспечивает сохранение первоначального образа — образа исходной ситуации при ее варьировании. Для этого необходима *инвариантная структура* — совокупность некоторых инвариантов, которая и является носителем данного образа.

Таким образом, инвариантная структура определяется не элементами, ее образующими, а системой отношений между этими элементами. При транспонировании осуществляется изменение элементов, звуков, составляющих мелодию, по высоте и другим параметрам, но сохраняется система отношений между ними.

Мелодия — своего рода классический объект для иллюстрации свойств транспозиции инвариантных отношений. Варьирование мелодии (правда, в наиболее простом ее виде — транспонирование ее в другую тональность, как показано на рис. 1.1) приводил в качестве примера еще Эренфельс (см. С. Л. Рубинштейн, 1935), отмечая инвариантность образа мелодии при изменении ее внешних носителей — последовательности звуков.

Разумеется, не всегда при варьировании ситуаций инварианты бывают столь легко видны, как в приведенных примерах. В дальнейшем это будет наглядно проиллюстрировано.

## § 1.2. Перенос и маскировка инвариантов

*Шахматная позиция. Куриный рефлекс. Неузнаваемая знакомая польжа. Разные окружности. Мелодические вариации популярной песни.*

В предыдущем параграфе на музыкальном примере было показано, что для сохранения образа мелодии при изменениях (вариациях) нотного текста необходимо сохранение некоторых отношений между элементами этого текста, называемых инвариантами. Характер отношений, сохраняемых при варьировании ситуаций, и, следовательно, остающиеся неизменными инварианты могут очень сильно отличаться и зависят от изменяемого объекта и способа изменения его.

В силу большого значения понятия «инвариант» и связанных с ним понятий «трансформанта» и «константа» для последующего изложения рассмотрим для их пояснения несколько примеров различной природы.

1. Рассмотрим шахматную позицию (рис. 1.3), представляющую собой связку трех фигур — белого короля, белого ферзя и черной ладьи. Эти фигуры расположены на пересечении некоторой фиксированной вертикали с номером  $\xi$  ( $\xi = a, b, c, \dots, h$ ) и соответственно  $k$ -й,  $f$ -й и  $l$ -й горизонталей ( $k, f, l = 1, 2, \dots, 8$ ) так, чтобы удовлетворялось следующее соотношение:

$$1 \leq k < f < l \leq 8. \quad (1.1)$$

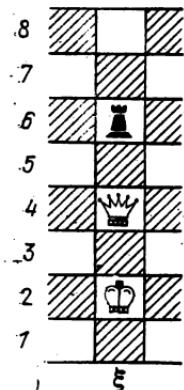
Рис. 1.3. Шахматная позиция — связка трех фигур.

При различных наборах значений тройки  $k, f, l$ ,

удовлетворяющих этой системе неравенств, как и при различных значениях  $\xi$ , получаются разные позиции. Все они, однако, содержат некоторый неизменный признак связки, характеризуемый соотношением (1.1). Все эти позиции можно рассматривать как вариации одной из них (исходной) и характеризовать общим названием «связка».

Таким образом, соотношение (1.1), или, иначе, расположение фигур, удовлетворяющее (1.1), является в нашей связке инвариантом. Примером трансформанты может служить номер  $\xi$ , а также тройка чисел  $k, f, l$ , при изменении (не нарушающем системы неравенств (1.1)) которых меняется и первоначальная позиция.

Заметим также, что если мы повернем теперь расположение фигур на  $90^\circ$ , то связка сохранится. Это означает, что  $\xi$  теперь является номером строки, а  $k, f$  и  $l$  — номерами соответствующих столбцов. При таком повороте знак  $<$  (имея в виду шахматную нотацию) будет играть роль алфавита следования. Поворот на  $180^\circ$  также не изменит позиции, однако при этом со-



отношение (1.1) примет вид

$$8 \geq k > f > l \geq 1. \quad (1.1a)$$

Таким образом, трансформантами могут служить здесь и повороты расположения фигур на 90, 180, 270°.

2. Интеллектуальный уровень курицы давно вошел в поговорку. Это подтвердилось и в различных психологических экспериментах, где в качестве испытуемых участвовали куры. Однако даже куры в состоянии выделять из множества ситуаций некоторые инварианты. Так, в психологии хорошо известны эксперименты В. Келера (см., например, С. Л. Рубинштейн, 1935), когда у курицы вырабатывался рефлекс на отношение. Они заключались в следующем.

Курице предлагают две круглые пластинки с зернами. Площадь  $S_1$  одной пластинки меньше площади  $S_2$  другой, т. е.  $S_1 < S_2$  (рис. 1.4, а). Если курица склевывает зерна с пластинки



Рис. 1.4. Пары пластинок с разными площадями в эксперименте с курами.

меньшей площади, то ее наказывают. Затем ситуацию видоизменяют: курице предлагают две круглые пластинки с зернами, площади которых  $S'_1$  и  $S'_2$  удовлетворяют тому же неравенству ( $S'_1 < S'_2$ ), но размеры этой пары пластинок не совпадают с размерами первой пары, и повторяют опыт (рис. 1.4, б). В результате многократного повторения таких опытов с разными парами пластинок, площадь одной из которых непременно меньше площади другой пластинки, у курицы вырабатывается рефлекс на отношение площадей пластинок, и из любой пары круглых пластинок с разными площадями она предпочитает большую.

Создается впечатление, что взгляд курицы скользит по воображаемой фигуре 'абвг' (рис. 1.5), образованной двумя сторонами угла и вписанными в него окружностями  $S_1$  и  $S_2$ , и курица (чтобы избежать наказания) стремится уйти в противоположную сторону от того неприятного места, где фигура сужается (рефлекс на отношение — где уже, там хуже).

Опыт видоизменяют еще так, что вместо пары круглых пластинок с разными площадями берут пару пластинок, окрашенных одним и тем же цветом, но разной интенсивности (рис. 1.6). В остальном опыт проходит так же. Тогда у курицы вырабатывается рефлекс на отношение интенсивностей цветов.

Таким образом, в каждом из этих случаев происходит переход отношений одних и тех же элементов из одной — первона-

чальной ситуации в другую — варьированную. В примере 2 первоначальной ситуацией является первая пара из предложенных пластиночек, а другие пары — ее вариацией. Инварианты — отношение величин площадей пластинок (меньше — больше) или отношение интенсивностей цветов (светлее — темнее). Трансформанты здесь — размеры пластинок или интенсивности цвета. Константами служат постоянная форма (1-й случай), цвет или

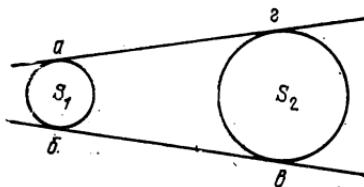


Рис. 1.5. Воображаемая фигура, «наблюдаемая» курицей в эксперименте.

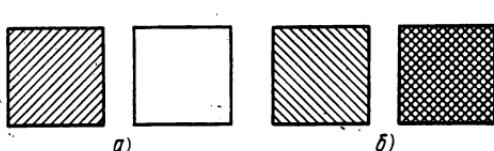


Рис. 1.6. Пары пластинок с разной интенсивностью окраски в эксперименте с курами.

интенсивность цвета, фиксированные для каждой пары и различные в каждом новом предъявлении (2-й случай).

3. Случилось так, что, проходя зимой по красивой лесной поляне, мы не узнали ее, хотя были здесь летом не один раз. И только внимательно приглядевшись, вспоминаем — те же деревья, кусты и вроде бы так же расположены, как было летом. Но уж очень изменилась общая картина, общий вид поляны: зеленый травяной покров сменился белым, снежным, оголились ветви. Оказывается, что все это замаскировало, изменило знакомую нам летом поляну до неузнаваемости, замаскировало знакомые очертания так, что затруднило обнаружение постоянных отношений между одними и теми же деревьями и кустами — т. е. то, что определяет вид и форму лесной поляны.

В этом примере одним из инвариантов будет взаимное расположение деревьев и кустов, постоянное как летом, так и зимой, т. е. некоторое постоянное отношение между ними. Трансформантой является преобладающий цвет: летом он зеленый, а зимой — белый. Трансформантой же служит и покров: летом — листья и трава, зимой — снег. Константы: летом — зеленые листья, трава; зимой — снежный покров на ветвях и на земле.

4. На рис. 1.7 изображены две геометрические фигуры. Аналитически они описываются соответственно уравнениями

$$x^2 + y^2 - 2,25 = 0,$$

$$x^2 + y^2 - 6x - 2y + 6 = 0.$$

Как видно из рисунка, эти фигуры разные по размеру, с различными уравнениями, по-разному расположены относительно системы координатных осей  $xOy$ , но воспринимаются они как оди-

шаковые — окружности. Для левой окружности центром служит точка  $O$  с координатами  $x = 0, y = 0$ , для правой — точка  $A$  с координатами  $x = 3, y = 1$ .

Общим, неизменным, или инвариантным, для этих фигур является их форма, обладающая следующим свойством: каждая из них представляет собой геометрическое место точек, равноудаленных от некоторой одной точки (центра окружности).

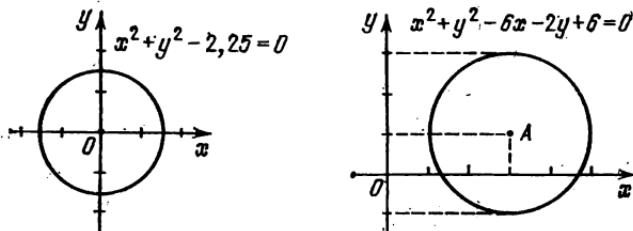


Рис. 1.7. Окружности, по-разному расположенные относительно системы координатных осей.

Это свойство окружностей (инвариант) и позволяет при визуальном восприятии обеих фигур увидеть в них общее, неизменное, несмотря на имеющиеся в них различия; оно определяет образ окружности. Любая из окружностей может быть получена из какой-то одной путем соответствующей замены переменных  $x$  и  $y$ , входящих в ее уравнение (перемещением до совпадения центров и соответствующим «расширением» или «сжатием»).

Трансформантами являются такие параметры, как величина радиуса (соответственно для левой и правой окружностей — 1,5 и 2), положение центра окружности относительно начала координат ((0, 0) и (3, 1)). Формально этими трансформантами являются коэффициенты  $a$ ,  $b$  и  $R$  в общем уравнении окружности, которое всегда может быть записано следующим образом:

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = R^2.$$

5. Проиграйте мелодию  $K_1$ , изображенную в нотной записи на рис. 1.8. Эта мелодия представляет собой вариацию заведомо всем хорошо известной мелодии-темы. Попробуйте определить на слух, вариацией какой мелодии является  $K_1$ . Вряд ли вам это легко удастся.

А ведь это пример так называемой *орнаментальной*, или *фигурационной*, вариации — наиболее простой тип вариаций, и, казалось бы, в ней должна легко прослушиваться и узнаваться тема — первоначальная мелодия. При получении вариаций такого типа каждая длительность ноты в теме дробится на несколько частей (одну, две, три, четыре и т. п.), причем в каждом таком дроблении высота ноты первой части (или высота первой ноты в каждом дроблении) совпадает с высотой ноты в теме до дроб-

ления. Совпадение высот пот и должно способствовать узнаванию темы в орнаментальной вариации. Однако при прослушивании вариации в ней не всегда легко улавливается тема, в чем можно убедиться на этом примере.

Мелодия  $K_1$  — это вариация (или трансформация) мелодии  $K_0$  на рис. 1.8, популярнейшего «Чижика», звучание которого, конечно, все хорошо знают.

Как видно из нотных записей мелодий  $K_0$  и  $K_1$ , длительность каждой половинной ноты темы  $K_0$  делится на четыре части — образуется ритмическая фигура, состоящая из четырех «восьмушек». Такую фигуру называют *квартолю*. Если в мелодии  $K_1$ ,



Рис. 1.8. Мелодии  $K_1$  и  $K_2$  — простые вариации хорошо знакомой мелодии  $K_0$ .

проиграть только первые ноты каждой квартоли, получится мелодия  $K_0$  — исходная тема. Это сразу видно и при простом разглядывании нот мелодий  $K_0$  и  $K_1$ , особенно если записать мелодии  $K_0$  и  $K_1$  так, чтобы соответствующие ноты находились на одной вертикали — одна под другой, как сделано на рис. 1.8.

Остальные ноты квартоли играют маскирующую роль, они просто мешают узнать тему — первоначальную мелодию  $K_0$ . Иначе говоря, они отвлекают внимание слушателя (и зрителя), мешают увидеть (или, точнее, услышать) те отношения элементов мелодии  $K_0$ , которые сохранились без изменения в  $K_1$  — вариации мелодии  $K_0$ . Они мешают услышать ту структуру, те неизменные в мелодиях  $K_0$  и  $K_1$  отношения элементов, которые мы воспринимаем как нечто единое и неделимое — как образ знакомой мелодии «Чижика». Если изменить эту структуру, разрушить форму, образуемую определенным фиксированным соотношением элементов (в нашем случае — нот), то полученную в результате такого изменения последовательность нот мы уже не будем воспринимать как образ знакомого «Чижика». Это уже будет нечто другое, отличное от него.

Легко убедиться в том, что одно лишь дробление нот  $K_0$  на квартоли при сохранении высот всех ее нот не мешает узнать тему. Для этого достаточно прослушать мелодию  $K_2$ , изображенную на рис. 1.8 в третьей строке.

Рассмотрим теперь инварианты, трансформанты и константы темы и вариаций  $K_p$  ( $p = 1, 2$ ), приведенных на рис. 1.8. При визуальном восприятии и сравнении нотной записи мелодии  $K_1$ ,

и порождающей ее темы  $K_0$  сразу (в отличие от восприятия аудиального — на слух) обнаруживается их близость. Как уже говорилось, мелодия  $K_1$  — пример орнаментальной, или фигурационной, вариации. В этой мелодии высота первой ноты каждой

квартоли  совпадает с высотой ноты, расположенной в теме на таком же временном расстоянии от начала мелодии. Это и есть инвариант — неизменная последовательность высот первых нот каждой квартоли с сохранением метрических акцентов — то, что создает, или формирует, образ «Чижика». В мелодиях  $K_0$  и  $K_1$  можно обнаружить еще один инвариант. Этим инвариантом служит последовательность интервалов между первыми нотами из каждой квартоли. Она совпадает с последовательностью интервалов между соседними нотами темы  $K_0$ .

При прослушивании темы и вариации обнаруживается, что введенные в вариацию при преобразовании темы новые элементы способствуют как бы отделению вариации от темы. Трансформантами здесь являются ритм (в вариациях  $K_1$  и  $K_2$ ) и мелодическая линия (в мелодии  $K_1$ ).

Константа, как уже указывалось, есть специфический постоянный для данной вариации элемент, многократно встречающийся в ней. Повторность в вариации — основное и необходимое свойство константы. В мелодии  $K_1$  константой является ритмическая квартоль — фигура, встречающаяся в ритме этой мелодии 13 раз. Тот же элемент служит константой и для мелодии  $K_2$ . В разных вариациях константы могут быть разными. Можно представить себе, например, мелодию с ритмической триолью  в качестве константы.

В вариациях  $K_1$  и  $K_2$  имеются и другие константы. Так, мелодические квартоли (т. е. мелодические фигуры, «нанизанные» на ритмические квартоли, или иначе — звуко высотная упорядоченная последовательность, составленная из четырех нот) в этих двух мелодиях также являются константами. Но, в отличие от ритмических констант, квартоли различны в мелодиях  $K_1$  и  $K_2$ . В мелодии  $K_2$  мелодическая константа характеризуется тем, что соседние ноты квартоли одинаковы по высоте: это выражается соотношением

$$W_{b+1} = W_b, \quad b = 1, 2, 3,$$

где  $W_b$  — высота ноты в квартоли,  $b$  — порядковый номер ноты в квартоли.

В мелодии же  $K_1$  эта константа характеризуется тем, что соседние ноты квартоли различны по высоте, т. е.

$$W_{b+1} \neq W_b, \quad b = 1, 2, 3.$$

Наибольшее маскирующее влияние оказывает в  $K_1$  мелодическая фигура, построенная на каждой ритмической квартоли. Если же в каждой квартоли высоты нот одинаковы, то в вариации тема узнается легче, что и обнаруживается при прослушивании  $K_2$ .

На примере этих двух мелодических квартолей видно влияние повторов на узнавание старого в новом и на усвоение информации. Чем разнообразнее строение мелодической фигуры (как в мелодической квартоли мелодии  $K_1$ ), тем больше маскируется тема  $K_0$  и тем труднее ее услышать (и увидеть!) в вариации (о роли повторности при восприятии см. ниже в § 5.3).

### § 1.3. Свойства варьированных ситуаций

*Маскировка инвариантных форм. Полинвариантность. Восприятие варьированных ситуаций. Тезаурус. Раскрытие механизма переноса инвариантных структур в условиях маскировки — одна из задач психологии и теории искусственного интеллекта.*

В примерах, рассмотренных в предыдущем параграфе, имело место варьирование, или трансформация, первоначальной ситуации. К какой бы области ни относились взятые нами примеры, эта трансформация проходила единообразно — сохранялся некоторый инвариант и вводились маскирующие элементы.

Можно привести еще несколько примеров варьирования ситуации из разных областей человеческой деятельности. Обратимся, например, к литературе. Весь художественный перевод служит примером описываемой нами схемы варьирования. Переводчик стремится максимально сохранить оригинальную структуру, стиль и содержание переведимого сочинения, но он волей-неволей привносит в перевод свой индивидуальный способ мышления и выражения своих мыслей. Достаточно сравнить между собой несколько переводов одного и того же произведения, чтобы ощутить различие.

Приведем для примера известное стихотворение Г. Гейне «Двойник», положенное на музыку Ф. Шубертом, и пять его переводов, принадлежащих соответственно Н. Огареву (1), И. Апненскому (2), А. Блоку (3) и И. Тюменеву (4, 5). (Последний вариант перевода был использован Ф. И. Шаляпиным при исполнении романса Ф. Шуберта.)

H. Heine

Still ist die Nacht, es ruhen die Gassen,  
In diesem Hause wohnte mein Schatz;  
Sie hat schon längst die Stadt verlassen,  
Doch steht noch das Haus auf demselben Platz.

Da steht auch ein Mensch und starrt in die Höhe,  
Und ringt die Hände vor Schmerzensgewalt;  
Mir graust es, wenn ich sein Antlitz sehe,  
Der Mond zeigt mir meine eig'ne Gestalt.

Du Doppelgänger, du bleicher Geselle!  
 Was äffst du nach mein Liebesleid,  
 Das mich gequält auf dieser Stelle  
 So manche Nacht, in alter Zeit?

#### 1. Н. Огарев

Тихо все ночью, и стогны в покое,  
 В доме здесь прежде живала она.  
 Город покинут ей давней порою,  
 Дом же остался, как в те времена.

Кто-то стоит тут и кверху взирает,  
 Руки ломает, измучен тоской.  
 Страшно мне! Месяц его озаряет —  
 Боже! То сам я стою пред собой.

Ты — мой двойник, ты — товарищ мой бледный,  
 Что передразнить вздумал меня,  
 Так же томиться, как некогда бедный  
 В долгие ночи томился и я.

#### 2. И. Анненский

Ночь, и давно спит закоулок:  
 Вот ее дом — никаких перемен —  
 Только жилицы не стало, и гулок  
 Шаг безответный меж каменных стен.

Тише... Там тень... руки ломает,  
 С неба безумных не сводит очей..  
 Месяц подкрался и маску снимает.  
 «Это не я: ты лжешь, чародей!

Бледный товарищ, зачем обезьянить?  
 Или со мной и тогда заодно  
 Сердце себе приходил ты тиранить  
 Лунную юношью под это окно?».

#### 3. А. Блок

Тихая ночь, на улицах дрема,  
 В этом доме жила моя звезда;  
 Она ушла из этого дома,  
 А он стоит, как стоял всегда.

Там стоит человек, заломивший руки,  
 Не сводит глаз с высоты ночной;  
 Мне страшен лик, полный смертной муки,—  
 Моя черты под неверной луной.

Двойник! Ты — призрак! Иль не довольно  
 Ломаться в муках тех страстей?  
 От них давно мне было больно  
 На этом месте столько почей!

#### 4. И. Тюменев

Спит город весь, во мраке раскинут.  
 Вот здесь когда-то ангел мой жил.  
 Уж его дом давно покинут,  
 А он все стоит так же, как и был.

Пред ним человек, и плачет он, бедный,  
Ломает руки в страданье немом..  
Мне страшно взглянуть на лик тот бледный,  
Ведь те же муки во мне самом!

Двойник печальный, смеешься ты что ли?  
Зачем же повторять точь в точь  
Мои страданья, муки, боли  
Пред домом этим день и ночь?

### 5. И. Тюменев

Город уснул спокойно, глубоко.  
Вот здесь, в этом доме, здесь она жила.  
Теперь она далеко-далеко,  
Но тот же, как прежде, этот старый дом.

Но кто там в тени и плачет, и стонет,  
Ломая руки в смертельной тоске?  
Мне жутко, я взгляд его встречаю,  
В лучах луны узнаю сам себя.

Кто ты, двойник мой, мой образ печальный?  
Зачем ты повторяешь вновь,  
Что пережил я здесь когда-то:  
Любовь мою, страдания мои?

Из приведенных текстов видно, что каждый переводчик, стремясь сохранить структуру немецкого стихотворения, тем не менее вносит в нее свои маскирующие элементы.

Наиболее четко схему варьируют пародисты литературных произведений. Наиболее талантливые из них четко вычленяют наиболее важные параметры и инварианты и сохраняют их в своих пародиях. Сравним, например, отрывки из произведения Виктора Шкловского «Сентиментальное путешествие» и известной пародии на него, принадлежащей выдающемуся мастеру литературной пародии Александру Архангельскому. Вот отрывок, автором которого является Шкловский: «Я писал свою книгу. Писал на маленьком круглом столике. Книги для справок держал на коленях. Прислали за мной и сказали, чтобы я ехал в Саратов, дали билет». А вот Архангельский: «Я пишу сидя. Для того, чтобы сесть, нужно согнуть ноги в коленях и наклонить туловище вперед. Не каждый, умеющий садиться, умеет писать. Садятся и на извозчика».

Что роднит эти два текста? Что вообще позволяет пародисту имитировать стиль и манеру того или иного поэта или писателя? К сожалению, полного ответа на этот вопрос в литературоведении пока нет. Но первые результаты уже имеются. В вышедшей в 1968 г. книге немецкого физика, литературоведа и кибернетика В. Фукса «По всем правилам искусства» (В. Фукс, 1975) показано, что один из важных инвариантов структуры исходного текста — средняя длина слов и средняя длина предложений, используемых авторами. Эта пара показателей позволяет легко отчленить собственно художественные произведения от научных,

политических, технических и других текстов. Введение ряда дополнительных параметров (например, среднее расстояние между подлежащим и сказуемым, процентное отношение сложноподчиненных предложений к простым, процент использования причастных оборотов, характерный набор слов в словаре и т. п.) позволяет описать инварианты того или иного литературного произведения или всей совокупности произведений данного писателя. В выявлении этой глубинной стилистической структуры произведения и варьировании на ее тему и заключается искусство пародирования. В науке же это позволяет приблизиться к решению задачи атрибутирования произведения, авторство которого не устанавливается на основании других источников.

Известны целые циклы пародий, в которых некое известное произведение «перелагается» на стиль многих авторов. Таковы знаменитые циклы «Козлы» или «Веверлеи» из сборника «Парнас дыбом», изданного еще в середине двадцатых годов, или цикл на стихи Маяковского «Мне легче, чем всем: Я — Маяковский. Сижу и ем кусок конский», созданный в пятидесятые годы С. Козловой.

Мы же для иллюстрации такого способа варьирования приведем с любезного разрешения автора два стихотворения И. Липкина из его цикла пародий об аварийном останове ЭВМ — АВОСТе. Эти стихи (или, говоря словами их автора, «комментарии по вопросу об АВОСТах, высказанные известными поэтами») сохраняют структуру хорошо известных нашим читателям стихотворений, отличаясь от них содержанием. Можно не сомневаться, что читатели безошибочно определят их прототипы, в которых, разумеется, речь шла не об АВОСТАх, убедившись на этом примере в значении инвариантной структуры при переносе ее на другое содержание.

#### Александр Пушкин

В машине уахлой и скучой,  
Без air-condition \*) раскаленной,  
АВОСТ, как грозный часовой,  
Стоит — один во всей вселенной.

Колода мятых перфокарт  
Его, в день счета породила,  
А, значит, с декабря на март  
Работы сдачу отложила.

Но человеку человек  
Не отодвинул срок на квартал.  
И тот послушно в путь потек  
И возвратился с новой картой.  
Пришел — и ослабел, и лег  
У пульта, словно у погоста,  
И умер программист у ног  
Неистребимого АВОСТа.

\*) Air-condition — система воздушного охлаждения.

И кто-то карту положить  
На вход таинственный решился,  
Сумел программу запустить,  
Издал препринт и защитился.

### Самуил Маршак

Вот БЭСМ,  
Которой владеет ВЦ,

А вот ввод,  
Который умеет читать перфорацию,  
А стало быть, может ввести информацию  
В БЭСМ,  
Которой владеет ВЦ.

А это колода,  
Которую ставят на вход того ввода,  
Который умеет читать перфорацию,  
А стало быть, может ввести информацию  
В БЭСМ,  
Которой владеет ВЦ.

А вот лаборантка, младая и пышная,  
Которая карту засунула лишнюю  
В большую и важную очень колоду,  
Которую ставят на вход того ввода,  
Который умеет читать перфорацию,  
А стало быть, может ввести информацию  
В БЭСМ,  
Которой владеет ВЦ.

А это АВОСТ,  
К которому путь неизбежен и прост,  
Когда лаборантка, младая и пышная,  
Вдруг карту засунет заведомо лишнюю  
В большую и важную очень колоду,  
Которую ставят на вход того ввода,  
Который умеет читать перфорацию,  
А стало быть, может ввести информацию  
В БЭСМ,  
Которой владеет ВЦ.

Маскировка инвариантной структуры имеет большое значение при преобразовании ситуации. Маскировка может осуществляться многими способами, что достигается комбинацией различных трансформант. Это часто осложняет восприятие ситуаций. Однако узнавание первоначальной ситуации в варьированной, по-видимому, облегчается полиинвариантностью при преобразовании, т. е. одновременным переносом нескольких инвариантных отношений (см. пример мелодических вариаций с двумя инвариантами в § 1.2).

Инвариантные структуры — носители образа первоначальной ситуации — часто воспринимаются в варьированных ситуациях неосознанно, как нечто, напоминающее первоначальную ситуацию. При этом различные маскирующие элементы по-разному влияют на степень близости первоначальной и варьированной си-

туаций. Естественно возникает задача обнаружения «порога узнавания», т. е. той минимальной маскировки, в результате которой в варьированной ситуации еще узнается первоначальная. Трудность решения этой задачи заключается прежде всего в том, что порог узнавания зависит не только от степени или способа маскировки, но и от свойств приемника (человека), участвующего в процессе этого узнавания. Известно, что большую роль при восприятии играют «настройка», «предпрограммирование», подготовленность приемника, называемые в психологии *установкой*, а также совокупность знаний и представлений, имеющихся у воспринимающего приемника и образующих его *тезаурус*.

Понятие тезауруса (греческое θῆσαυρος — сокровище, запас) используется в исследованиях, связанных с разработкой семантических (смысловых, или содержательных) аспектов теории информации, которые имеют непосредственное приложение к исследованию восприятия текстов и других видов осмыслинной информации, например, художественных произведений (см., например, Ю. А. Шрейдер, 1967; И. Грекова, 1967)\*).

Поскольку в настоящей книге значительное число примеров относится к музыке, в приложении (словаре музыкальных терминов) и в гл. 3 приведены краткие сведения по музыкальной грамоте, назначение которых — сформировать у читателей, не знакомых с основами музыкальной теории, тезаурус, обеспечивающий понимание музыкальных примеров.

Транспонирование (перенос) и выделение инвариантных структур — общие, важные свойства восприятия, которые наблюдаются в разных областях продуктивной деятельности человека (например, при подражании, при переносе идей из других видов деятельности) и часто проявляются неосознанно, но без них невозможно восприятие и, следовательно, мышление. Вследствие этого выявление закономерностей транспонирования инвариантных структур является одной из важных задач психологии мышления и творчества. Без ее решения вряд ли возможно моделирование процессов мышления и творчества, т. е. решение наиболее сложных проблем научного направления, называемого искусственным интеллектом. Так же тесно эта задача связана с проблемой понимания, одной из основных в современной психологии и совершенно необходимой для реализации диалога человека с системами искусственного интеллекта.

\* ) Роль и значение тезаурусов, их виды и взаимосвязь различных видов при восприятии документальной информации подробно рассмотрены в работе Г. Воробьевы (1973). К документальной информации относятся все виды информации, записанной на некоторых носителях и допускающей многократное ее извлечение (восприятие). Примерами документальной информации являются разного рода тексты, нотные записи, произведения живописи и т. п. Несовпадение тезаурусов сообщения и приемника, воспринимающего это сообщение, делает невозможным осмыслинное, адекватное восприятие информации (смысла), содержащегося в сообщении. (Прим. ред.)

Один из путей в решении этой задачи — модельное исследование программы для ЭВМ, выполняющей подобные трансформации. Такая программа, позволяющая реализовать механизм транспонирования, а также фиксировать обнаруживаемые при этом закономерности и возникающие промежуточные результаты, позволяет, во-первых, *осознать* механизм транспонирования инвариантных структур, а во-вторых, служит удобным инструментом для выявления и анализа общих закономерностей исследуемого процесса.

Как известно, одной из особенностей восприятия является его конкретный характер. Несмотря на то, что в восприятии различных объектов имеется много общего, изучать его можно, лишь ограничив область исследования некоторым классом воспринимаемых объектов. Поэтому ниже описываются принципы построения программы и результаты анализа, проводимого с ее помощью, для одного достаточно широкого класса объектов — для музыкальных текстов.

## ГЛАВА 2

# МОДЕЛИРОВАНИЕ — МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ТВОРЧЕСТВА

### § 2.1. Моделирование на вычислительной машине

*Моделирование, или имитация объекта исследования. Выявление существенных параметров. Роль неосознаваемых факторов при моделировании. Математическое моделирование.*

Выше уже отмечалось, что основным методом исследования, используемым в настоящей работе, является моделирование с помощью ЭВМ. Моделирование широко используется в науке и технике как метод исследования сложных систем, поддающихся формализации, т. е. таких, свойства и поведение которых могут быть формально описаны с достаточной строгостью. В нашем случае, когда речь идет о процессах творчества, эвристической деятельности, анализе психических функций, игровых задачах, конфликтных ситуациях, процессах принятия решений и т. п., объекты исследований обычно настолько сложны и разнообразны, что трудно говорить об их строгой формализации, тем более что многие глубинные свойства перечисленных объектов (процессов) изучены еще недостаточно.

С другой стороны, в процессе многочисленных неформальных исследований этих объектов сформулированы различные, часто противоречивые умозаключения о свойствах этих объектов, их структуре, сущности тех или иных параметров, взаимосвязях отдельных составляющих их элементов и т. п. Совокупность этих умозаключений образует некое представление об объекте исследования, его неформальную «теорию» или даже несколько взаимоисключающих друг друга «теорий». Естественно, что такие теории, являющиеся не чем иным, как более или менее правдоподобными гипотезами, нуждаются в проверке, подтверждении и установлении области их применения.

Поясним сказанное простым примером. Так, исследование музыкальных звуков часто заканчивается на этапе анализа слуховых восприятий или графической записи звучания, получаемой, например, посредством прибора типа «видимый звук». Однако формулируемые при этом выводы — лишь предположения, не всегда достоверные. Обратимся к анализу одного из выразительных исполнительских приемов игры на виолончели или скрипке — портаменто легато, или портаменто на один смычок (портаменто — способ певучего исполнения пары звуков путем лег-

кого скольжения от одного звука к другому). Выводы о структурных характеристиках портamento неправомерно делать на основе анализа тех слуховых восприятий, которые получены при прослушивании исполнения музыкального произведения, где используется этот прием, или из анализа графической записи исполнения. Ведь одновременно неявно используются и другие исполнительские приемы — vibrato, изменения силы звука при ведении смычка. Они накладываются друг на друга и этим затушевывают искажают истинную картину исследуемого приема.

Из приведенного примера видно, что даже в относительно простых задачах непосредственное исследование объекта (процесса) часто оказывается весьма затруднительным и не позволяет получать надежные объективные результаты.

Среди различных способов проверки гипотез, часто полученных и эмпирическим путем, одним из наиболее эффективных является воспроизведение, имитация, интересующих исследователя свойств и сторон анализируемого объекта искусственным путем с учетом закономерностей и особенностей, установленных при предварительном анализе. Метод этот носит название *имитационное моделирование*.

Так, если при исследовании мелодий какой-нибудь народности удается по закономерностям, выявленным при анализе этих мелодий, построить (синтезировать) новые мелодии и эти мелодии будут восприниматься как мелодии данной народности, то тем самым подтверждается предположение о том, что выявленные закономерности действительно определяют особенности мелодий рассмотренного вида.

Заметим, что такое подтверждение будет убедительным, если синтез осуществлялся формально, с использованием только сформулированных предположений, и если при оценке результатов эlimинированы субъективные факторы. Если в рассмотренном случае синтез осуществлялся не формально, а выполнялся, например, человеком — музыкантом, которому были сформулированы те закономерности, которые следовало использовать при сочинении мелодии, такой метод проверки теряет свою доказательность и становится *субъективным*. Это объясняется тем, что в процессе эвристической деятельности, какой является сочинение мелодий, человек может даже неосознанно реализовывать какие-то дополнительные закономерности, помимо заданных. Эти дополнительные неосознанные закономерности и факторы часто могут играть весьма существенную роль, а заданные, осознанные закономерности могут оказаться и несущественными, что подтверждается многочисленными примерами из разных областей творческой деятельности человека, таких, например, как живопись, музыка, различные игры.

В процессе анализа выявляются различные параметры — при-

знаки или характеристики объекта и часто эти параметры (поскольку они обнаружены в исследуемом объекте) принимаются за существенные. На самом деле, однако, они могут быть и несущественными — они просто не мешают этому объекту быть самим собой, не меняют его сущности. В то же время существенные для него параметры могут оказаться скрытыми для исследователя и не обнаруживаться при анализе.

Таким образом, возникает вторая задача — установление существенности выбранных исходных закономерностей, а также выделение среди них основных, определяющих, и несущественных, которые либо просто не влияют на исследуемое явление, либо вытекают из остальных закономерностей. Решение этой задачи также может быть осуществлено методами имитационного моделирования.

Используемые во многих творческих процессах теории и знания, как правило, имеют интуитивный характер, не подтверждены формально-логически; так же интуитивно устанавливаются и области применения, и способ их использования. Однако, если эти интуитивные знания приводят к полезным результатам, то есть основания предполагать, что они базируются на объективных закономерностях, которые, будучи выявлены, могут лежать в основу автоматизации соответствующего творческого процесса или, иными словами, послужить основой для его моделирования. Выявление таких объективных закономерностей эвристических, на первый взгляд неформализуемых процессов, каким, в частности, представляется и творчество, осуществляется методами эвристического программирования, т. е. по существу разновидностью имитационного моделирования.

Выше уже отмечалось, что научная ценность и объективная достоверность результатов имитационного моделирования тем выше, чем полнее исключены из них субъективные факторы и чем формальнее строятся такие модели. Поэтому при решении перечисленных задач проверки гипотез, выявления объективных существенных закономерностей, лежащих в основе изучаемого явления или процесса, наиболее удобно имитационное моделирование с помощью ЭВМ, называемое также математическим моделированием.

В основе математического моделирования на ЭВМ лежит математическая модель, т. е. формальное описание известных или предполагаемых закономерностей, выявленных при содержательном, эвристическом анализе исследуемого объекта. Модель эта реализуется в виде машинного алгоритма, результат работы которого — описание имитируемого процесса или исследуемого явления. При моделировании процесса сочинения музыки, например, конечный результат — нотная запись музыкального текста и перечень тех закономерностей, которые участвовали в его синтезировании.

Естественно, что ничего «своего», *не осознанного* предварительно человеком, модель и алгоритм не содержат. Критерием качества такого математического моделирования, критерием правильности и полноты составленной модели является степень сходства полученных на ЭВМ результатов с результатами соответствующей человеческой деятельности. Неудовлетворительность машинных результатов объективно доказывает неполноту или неправильность исходных посылок, использованных при составлении и алгоритмической (программной) реализации математической модели, и требует пересмотра исходных посылок, дополнения модели новыми данными, т. е. совершенствования построенной модели.

При моделировании на вычислительной машине, таким образом, объективно проверяется *достаточность тех знаний, которыми обладает машина* (или, точнее, *ее программа*), для реализации изучаемого процесса или объекта. Такое моделирование позволяет подтвердить наши предположения, гипотезы, о механизме исследуемого объекта или процесса, о его закономерностях, правомерность наших представлений о структуре объекта, а также помогает установить степень его изученности.

Составление алгоритма (машинной программы) требует формализации всех элементов и структуры исследуемого объекта, входящих в этот алгоритм, и тем самым способствует логической ясности в понимании его. Непременным условием при этом является строгая и формальная точность определения (раскрытия содержания) всех понятий, вводимых в программу.

## § 2.2. Три этапа моделирования

*Дифференциальный и целостный подходы при моделировании. Анализ, синтез, оценка модели — три этапа моделирования. Способы оценки модели. Трудности объективной (межличностной) оценки моделей объектов художественного творчества: необходимость специального эксперимента для преодоления психологической установки экспертов. Цель машинного творчества — не создание шедевров.*

Для моделирования существенно объединение дифференциального (атомистического) и структурно-целостного подходов, диалектическое единство анализа и синтеза при исследовании изучаемых явлений. Моделирование заключается в имитации изучаемого явления. Точность имитации определяется путем сравнения полученного при воспроизведении результата с его прототипом, объектом исследования, и оценки степени их сходства.

В целом, моделирование включает в себя три необходимых этапа: анализ объекта исследования, построение (синтез) модели, получение результата и его оценка путем сравнения с объектом.

Рассмотрим более детально эти этапы.

**Анализ объекта моделирования.** Выше уже отмечалось, что в основу модели при ее формировании кладутся некоторые первоначальные знания об объекте, закономерности, устанавливающие свойства этого объекта (или класса объектов), его характеристики, особенности связи между составляющими объект элементами. Получение этих знаний и их уточнение являются содержанием первого этапа моделирования.

На этом этапе формируется возможно более полное описание объекта: выделяются его элементы, устанавливаются связи между ними, вычленяются существенные для исследования характеристики, выявляются параметры, изменение которых влияет или может влиять на объект.

На том же этапе формируются подлежащие последующей проверке гипотезы о закономерностях, присущих изучаемому объекту, о характере влияния на него изменения тех или иных параметров и связей между его элементами.

На том же этапе исходные предположения переводятся на четкий однозначный язык количественных отношений и устраняются нечеткие, неоднозначные высказывания или определения, которые заменяются, быть может, и приближенными, но четкими, не допускающими различных толкований высказываниями.

**Формирование (синтез) модели** представляет собой второй этап моделирования. На этом этапе в соответствии с задачами исследования осуществляется воспроизведение, или имитация, объекта на ЭВМ с помощью программы, которая включает в себя закономерности и другие исходные данные, полученные на этапе анализа. Структура модели существенно зависит от задач исследования. Так, например, если проверяется полнота и правильность наших знаний об объекте, последний имитируется с использованием всех известных исходных соотношений. Если же задача заключается в проверке некоторых предположений и степени их общности, то именно эти предположения вводятся в программу и в результате имитации получаются объекты, которые лишь частично отражают реальные свойства имитируемого объекта.

**Оценка машинных результатов** заключается в установлении адекватности модели и объекта исследования — в определении степени близости, сходства, машинных и человеческих действий или их результатов. При этом существенно не «абсолютное качество» машинных результатов, а степень сходства с объектом исследования. Так, при моделировании музыкальных сочинений важно не то, чтобы машинная музыка была «лучше» музыки композиторов-классиков, а чтобы она была похожа на ту, которая исследуется, и — в идеале — была от нее неотличима (по эмоциональности, по выразительности, по синтаксической сложности, принадлежности к типу, стилю и т. п.).

Успешный результат сравнения (оценки) исследуемого объекта с моделью свидетельствует о достаточной степени изученности объекта, о правильности принципов, положенных в основу моделирования, и о том, что алгоритм, моделирующий объект, не содержит ошибок, т. е. о том, что созданная модель работоспособна. Такая модель может быть использована для дальнейших более глубоких исследований объекта в различных новых условиях, в которых реальный объект еще не изучался.

Чаще, однако, первые результаты моделирования не удовлетворяют предъявленным требованиям. Это означает, что по крайней мере в одной из перечисленных выше позиций (изученность объекта, исходные принципы, алгоритм) имеются дефекты. Это требует проведения дополнительных исследований и соответствующего изменения машинной программы, после чего снова повторяются второй и третий этапы. Процедура повторяется до получения надежных результатов. Такая схема многоэтапного моделирования, используемого в самых разнообразных исследованиях, приведена на рис. 2.1.

чаях эти признаки обнаруживаются непосредственно: например, в модели гармонизации — путем отыскания ошибок, в модели шахматиста (шахматной программе) — по результатам игры с настоящими шахматистами. В других случаях существенные признаки оказываются «скрытыми» и для их отыскания приходится прибегать к специальному эксперименту. Как правило, это имеет место при оценке моделей художественных произведений.

Как известно, художественные произведения относятся к тому упомянутому выше виду объектов, для оценки которых не существует объективных критериев. Так, одно и то же музыкальное произведение разными критиками оценивается по-разному. И более того, как показывает практика, один и тот же (даже профессиональный) критик одно и то же произведение в разное время может оценивать тоже по-разному. На оценку влияют разные факторы: привычка, субъективный опыт, вкус, общественное мнение, дух противоречия этому мнению и многие, многие другие. Весьма важна и психологическая установка (предвзятость) по отношению к произведению, его автору, жанру, стилю и тому подобным параметрам оцениваемого произведения.

Все вышеуказанное относится к художественным произведениям, созданным профессиональными авторами, например композиторами-профессионалами. Проблема значительно осложняется, когда требуется оценить *машинное сочинение* — стихи или музыку. Здесь особенно ощутимо проявляется психологическая предвзятость эксперта по отношению к машинному творчеству. Эта предвзятость проявляется двояким образом: либо отрицание «творческих» возможностей машины, когда эксперт, даже не ознакомившись с машинным сочинением, не прослушав его, заранее «знает», что «машина не может», либо восторженное почитание машинного творчества. Эксперты и первого, и второго типа не могут объективно (без предвзятости) оценить машинное сочинение, и нужен специальный эксперимент, в ходе которого их установка могла бы быть разрушена.

Задача такого объективного в социологическом смысле эксперимента — преодоление психологической установки экспертов по отношению к машинному творчеству (модели), создание таких условий, чтобы они заранее не знали, оценивают ли они человеческие произведения или их машинные модели.

Методика подобного социологического эксперимента для оценки машинной и человеческой музыки была разработана автором (Р. Х. Зарипов, 1971а)\*). При этом задача заключалась в получении сравнительной оценки человеком мелодий, сочинен-

\*) Нам неизвестно, проводились ли подобные социологические эксперименты-«плебисциты» зарубежными исследователями. Во всяком случае, в зарубежных публикациях, посвященных применению ЭВМ в музыке, описывается лишь эксперимент, разработанный автором настоящей книги (см., например, Зелинский, 1973; Пистровски, 1975; Копржива, 1972 и др.).

ных профессиональными композиторами и машиной. Проблема оценки машинных композиций и сравнения их с сочинениями композиторов может решаться только путем опроса самих слушателей. Эта проблема связана с особенностями психологии слушателей, воспринимающих музыку, которые не могут объективно оценить композиции, если они наперед знают, что, скажем, мелодия 1 — машинная, а 2 — человеческая, подобно тому, как нельзя объективно оценить популярные, «запетые» мелодии. Поэтому для объективного сравнения слушатели не должны знать, что они в данный момент оценивают — машинную или человеческую музыку.

Какую же человеческую музыку следует брать для сравнения с машинными мелодиями? Вещи несопоставимые, несравнимые между собой, сравнивать нельзя. Так, недопустимо мелодии песен сравнивать с монументальными концертными произведениями вроде симфоний или с фортепианными сонатами, а также с мелодиями из таких произведений. Сравнивать надо композиции одинаковой структуры, одинакового объема, одинаковой синтаксической сложности, например мелодии с мелодиями.

Для эксперимента были выбраны мелодии песен известных советских композиторов, опубликованные в сборниках избранных песен, и мелодии, сочиненные на вычислительной машине «Урал-2». Все мелодии проигрывались в произвольном порядке, неизвестном слушателям-экспертам, которые оценивали их по пятибалльной системе и оценки записывали на бланках-протоколах. Эксперимент проводился в разных социомузикальных группах, в каждой из них уровень музыкальной подготовленности участников эксперимента мог считаться примерно одинаковым. Это были студенты Московского энергетического института, студенты Государственного музыкально-педагогического института имени Гнесиных, участники Всесоюзного симпозиума «Проблемы художественного восприятия», школьники старших классов, математики — участники методологического семинара Математического института АН СССР имени В. А. Стеклова и Вычислительного центра АН СССР, работники предприятий культуры и др.. Всего в эксперименте участвовало более шестисот человек\*). Кроме того, подобный «плебисцит» был проведен на основе передач по первой программе Центрального радиовещания 25 августа 1973 г., 29 июня 1976 г. и 15 июля 1980 г.

При обработке данных эксперимента и из рассмотрения протоколов выяснилось, что принятая методика проведения эксперимента позволила преодолеть психологическую предвзятость, о которой говорилось выше: эксперты не различали, где человеческое, а где машинное сочинение. Не осознавая и не желая того, большинство экспертов оценивали выше машинную музыку. В ре-

\* ) В художественной форме этот эксперимент описан в романе Вл. Орлова «Альтист Данилов» (Новый мир, № 2, 1980).

зультате этого во всех группах машинные композиции получили (по разным критериям) более высокую оценку, чем мелодии композиторов. Вот как были оценены мелодии в такой подготовленной аудитории, как студенты института имени Гнесиных:

Оценка, баллы	5	4	3	2	1	C
Машинам	76	253	204	22	5	3,67
Композиторы	61	213	247	31	8	3,51

Здесь показано, сколько различных оценок (5, 4, 3, 2, 1) получили мелодии, сочиненные машиной и композиторами; С — соответствующие средние оценки за мелодии.

Хотя эксперты не знали, какую — человеческую или машинную — музыку они оценивают, некоторые из них высказывались довольно категорично: «Вся машинная музыка — не музыка, нет чувства», «Да чтобы я не отличил машинную музыку от человеческой!», «Много чрезмерно периодичных, туповато-машинных тем». Но — ирония судьбы — именно эти эксперты, не осознавая и не желая того, оценили выше машинную музыку. Их «очевидное» представление о машинной музыке оказалось ошибочным.

Весьма показателен в этом смысле и «плебисцит», проведенный на основе передачи по первой программе Центрального радиовещания 29 июня 1976 г. Цель его — выяснить, как радиослушатели оценивают творческие возможности машин и какой они представляют себе машинную музыку. Для этого им предложили прослушать три мелодии и определить, кто является их автором — человек или машина. Результат опроса в отношении одной из мелодий был неожиданным. В своих письмах радиослушатели отмечали, что в этой мелодии «чувствуется душа», она «отличается мелодичностью, пленяет слух, проникает в сердце», что «конечно же, такую музыку мог написать только человек», «никакая машина не сможет заменить человека в этом тонком творческом процессе, и не надо пытаться это делать».

Авторы 125 писем (из 130, поступивших в редакцию) были твердо убеждены, что эта мелодия написана композитором (только 5 человек с некоторыми оговорками приписывали ее машине). И 125 человек из 130, хотели они этого или нет, дали тем самым весьма высокую оценку творческим возможностям машины, показав ошибочность своего представления о машинной музыке. А мелодию эту сочинила машина по программе автора, описанной ниже (см. гл. 5).

Часто оказывается, что если слушатели не знают о «нечеловеческом» происхождении музыки, то и воспринимают ее как вполне «нормальную», не отличающуюся от обычной. Так, на Международном совещании по искусственному интеллекту, проходившем в городе Репино (под Ленинградом) в 1977 г., на русском и английском языках прозвучала «ИИ-канцата» — своего.

## «ИИ-КАНТАТА»



Рис. 2.2. Гимн искусственному интеллекту.

рода гимн искусственному интеллекту, сочиненный по предложению Оргкомитета совещания (рис. 2.2). Слова написал А. Аверкин, а музыка была сочинена на машине «Урал-2» по программе, описанной в книге Р. Х. Зарипова (1971а). Исполненная в непринужденной обстановке оркестром и певцами, эта песня была воспринята как обычное музыкальное произведение, и не все участники совещания сразу поверили, что музыку этого гимна сочинила машина \*).

Результаты этого эксперимента, проведенного многократно, подтверждают следующий факт: при моделировании на ЭВМ таких форм музыкального творчества, как сочинение мелодий массовых песен, получены машинные результаты, которые не только соизмеримы с человеческими, но в ряде случаев превосходят последние по качеству. Это позволяет судить о высокой степени изученности механизма порождения таких мелодий и подтверждает правильность выбранных принципов моделирования.

Этот эксперимент представляет собой реализацию идеи Тьюринга об испытании на интеллектуальность («игре в имитацию»)

\* ) Заметим, кстати, что все нотные примеры, полученные машиной по программам автора, публикуются им без всяких изменений и корректировок.

**ИИ-КАНТАТА**

Музыка ЭВМ «Урал-2»  
Слова А. Аверкина

Вас встречает Репино —  
Тут простор мечтам.  
Интеллект искусственный  
Мудр не по летам.  
Диалог с программами,  
ЭВМ с экранами,  
Шимпанзе с бананами  
Мы покажем вам.

*Припев:*

Искусственный интеллект  
Стал теперь проблемой века.  
С искусственным интеллектом  
Мы прославим человека.

Нам читают лекции  
Главные специ —  
Всех систем искусственных  
Деды и отцы.  
Фреймы и сценарии  
Внукам мы оставили,  
Пусть в них разбираются  
Наши молодцы.

*Припев*

Мы ведем дискуссии, а  
За окном весна —  
И модель без этого  
Будет не полна.  
Пусть там ходят роботы  
И качают хоботом.  
Мы же кубок дружеский  
Осунлим до дна.

*Припев*

применительно к музыке. Тьюринг (А. Тьюринг, 1960) предложил судить о наличии «интеллекта» по результатам «игры в имитацию», которая сводится к следующему. В игре участвуют некое лицо (эксперт) и две системы *A* и *B*, одна из которых — человек, а другая — машина. Эксперт, не видя этих систем, задает любые вопросы системам *A* и *B* и, анализируя их ответы, должен определить, какая из них является машиной. Если он не сможет определить этого в течение заданного времени, то такая машина считается «интеллектуальной».

Из результата упомянутого выше эксперимента следует, что программа-композитор, синтезирующая эти мелодии, выдерживает тест Тьюринга \*).

**AI-CANTATA**

Music: Computer «Ural-2»  
Text: A. Averkin

We meet you in Repino —  
Hope, we'll be kind.  
Artificial Intelligence  
Has a plastic mind.  
Look at machine's conversation,  
Robot's travel simulation,  
Monkey in logic of action  
And what else you'll find.

*Refrain:*

Artificial Intelligence!  
It became the greatest problem.  
Artificial Intelligence!  
It glorifies Homo Sapiens.

At the joint conference  
There are experts —  
Of every system intellect  
Dadies and granddads,  
Frames and scripts in memory  
We present to our children,  
Now they are studied by  
Our progeny.

*Refrain*

We're discussing Robotics.  
Outside it's spring,  
Add spring to your Theory —  
It will be complete.  
Let it be the robot's peace  
With a swinging proboscis.  
We'll empty a frendly glass  
And then we shall sing.

*Refrain*

\*) Напомним, что создание программ, выдерживающих тест Тьюринга, входит в перечень конкретных задач, относимых к проблеме искусственно-го интеллекта (см. введение).

Нужно отметить, что мелодии композиторов в эксперименте — независимо от их качества или отношения к ним слушателей — являются результатом той профессиональной деятельности человека, которую принято называть творчеством. Здесь имеется в виду, что продукты художественного творчества — это не только мировые шедевры искусства: Седьмая («Ленинградская») симфония Д. Шостаковича в интерпретации Е. Мравинского, «Вариации на тему рококо» П. Чайковского в исполнении Д. Шафрана, романс «Я помню чудное мгновенье» М. Глинки в исполнении И. Козловского и т. п., но и многие тысячи других произведений. Поэтому не следует нигилистически отмахиваться от тех продуктов художественного творчества, которые по тем или иным причинам не стали шедеврами или просто популярными, ибо причина популярности художественного произведения — особая проблема, не изученная до настоящего времени.

Практика проведения упомянутого выше эксперимента показывает, что понятие продукта художественного творчества ассоциируется у слушателей преимущественно (за редким исключением) лишь с популярными произведениями, наиболее им знакомыми. И даже более того — не столько с популярными, сколько с наиболее значительными по их эстетическим качествам, можно сказать, в некотором смысле — с шедеврами мирового искусства. Ведь нередки случаи снисходительного отношения даже к творчеству оригинальнейших композиторов, создавших, например, эпоху в советской песне.

У композитора — члена Союза композиторов СССР — высокий уровень профессионализма и мастерства; у композитора, окончившего консерваторию (и не только Московскую), — тоже достаточно высокий уровень, чтобы произведения его могли быть эталоном в подобном эксперименте. Ведь мелодия такого композитора обязательно включает в себя элементы профессионализма. Студенты на учебных занятиях «набивают руку» в технике и впоследствии используют эти навыки в своей творческой практике уже автоматически. Все это особенно ощутимо проявляется в тонкостях, в деталях, что, собственно, и отличает профессионала от дилетанта, от самодеятельного сочинителя музыки. Композитор-профессионал просто уже органически не может писать как дилетант, ибо он приучен или привык писать профессионально. (Чтобы предостеречь очевидные возражения, следует сразу же оговориться: здесь имеются в виду общие правила, а не возможные исключения из них.) Таким образом, эксперимент помогает оценить степень «профессионализма» в машинной музыке, а отнюдь не степень ее «художественности».

Остановимся теперь на высказываниях некоторых участников эксперимента о том, что мелодии композиторов, использованные в эксперименте, серые и бездарные, и только поэтому машинные мелодии получили более высокую оценку. Авторы этих высказы-

ваний, находясь под гнетом установки «машина не может», забывают, что задача заключается пока не в машинном создании шедевров или произведений искусства, а прежде всего в выявлении закономерностей музыкальных композиций как результата творческого процесса и в их машинном воспроизведении. Кроме того, проблема заключается и в способе отыскания объективных (межличностных) критериев оценки продуктов художественного творчества.

Оппонентам трудно изменить установку, отношение к понятию художественного творчества. Следует, однако, помнить, что знакомые многим, а тем более любимые произведения, это лишь малая часть — капля в океане того, что создается в результате художественного творчества. А все остальные произведения — как это ни печально и ни горько для их авторов — остаются безвестными и часто никогда и никем не исполняются, но от этого они не перестают быть продуктами художественного творчества. Здесь часто происходит терминологическая путаница. Понятие о продукте (или результате) художественного творчества необоснованно смешивается с понятием о произведении искусства, к которому предъявляются повышенные эстетические требования, а эту тонкость в понятиях, очевидно, не все улавливают.

Аналогичная ситуация имеет место и в других видах художественного творчества.

### § 2.3. Синтезирование — частный случай моделирования

*Синтезирование и моделирование. Синтезирование в музыке.*

Выше уже отмечалось, что один из этапов моделирования — синтез, построение модели и воспроизведение результата функционирования этой модели (синтез результата). В общем случае такое синтезирование не является самоцелью, а служит для последующего сравнения модели с оригиналом, в результате которого проверяется соответствующая теория и гипотеза.

Бывают, однако, случаи, когда цель экспериментов — синтезирование нового, и тогда сходства с оригиналом не требуется; больше того, оно может оказаться нежелательным. Так, средства электронного синтеза — электромузыкальные инструменты — позволяют получать тембры, как имитирующие классические музыкальные инструменты (скрипка, кларнет, рояль и т. п.), так и новые, неизвестные в музыкальной практике. В первом случае происходит моделирование известных тембров, во втором более уместно говорить просто о синтезировании новых тембров. Очевидно, что первое значительно труднее — ведь для этого надо знать количественные характеристики звучания инструментов.

Другой пример. Моделирование и синтезирование (сочинение) музыки имеют между собой много общего и внешне вроде бы не

отличаются друг от друга: ведь результатом как моделирования, так и сочинения (синтезирования) музыки на вычислительной машине служат музыкальные композиции — музыкальные пьесы, записанные в виде обычной нотации. Однако моделирование музыки не сводится к синтезированию (сочинению) музыки. Для моделирования необходимо знать параметры имитируемого объекта, тогда как просто для синтезирования этого не требуется,— любой произвольный набор параметров синтезирует обязательно что-то, но не моделирует. Таким образом, моделирование и собственно синтезирование (сочинение) имеют разные цели, разные задачи. Иначе говоря, моделирование — это синтезирование с последующей оценкой сходства модели и оригинала.

Первые опыты сочинения машинной музыки появились в конце пятидесятых годов и были посвящены моделированию музыки (в основном — мелодий) традиционной структуры. Позднее к машине обратились композиторы. Моделирование музыки, более пригодное для исследовательских работ, оказалось малоэффективным для получения практических результатов при сочинении профессиональной музыки. Поэтому композиторы стали использовать машину лишь в качестве помощника для выполнения рутинной части творческого процесса.

Уже упомянутая выше сложность постановки объективного эксперимента при моделировании музыкальных объектов привела на Западе к тому, что исследователи постепенно стали переходить от идеи моделирования (в первых экспериментах; см. о них в обзорной части книги: Р. Х. Зарипов, 1971а) к значительно легче осуществимой идеи синтезирования музыки, структура которой существенно отличается от ранее известной музыкальной структуры. Это же, по существу, признает в своем обзоре об использовании ЭВМ при сочинении музыки и американский композитор Хиллер (Хиллер, 1970), называющий мелодии традиционной структуры (мелодии массовых песен) *народными мелодиями* (*folk-tunes*).

В новых же музыкальных системах последовательности нот образуются на основании правил, вводимых композитором умозрительно, без какой-либо связи с традиционными структурами, известными музыкальной практике,— так появляется конструктивистская система.

При сочинении такой музыки использование вычислительных машин оказалось очень удобным для получения различных вариантов звуковых сочетаний, из которых композитор выбирает подходящие по своему усмотрению. Таким образом, машина используется для производства заготовок, черновых вариантов звуковых сочетаний. Синтезирование огромного количества возможных вариантов таких сочетаний вручную весьма затруднительно и требует большого времени и кропотливого, отнюдь не творческого труда. Кроме того, те сочетания (лишь весьма малая доля

из всех возможных), которые композитор получает вручную, часто плохо подходят для выражения творческого замысла. Нужны талант большого мастера и огромная творческая интуиция, чтобы среди множества потенциально возможных комбинаций увидеть (или точнее — услышать) комбинацию подходящую,озвученную задуманной идеей. Эта задача подобна проблеме «видения» мелодии темы для написания фуги — особой формы полифонического произведения. Как известно, не любая наперед заданная мелодия годится в качестве темы для сочинения фуги. Об этом можно судить хотя бы по следующему высказыванию С. С. Скребкова: «...путь, исходящий из предварительного сочинения всей темы целиком, заведомо связан со случайностью и ни в коей мере не гарантирует успеха» (С. С. Скребков, 1951, с. 223). И лишь выдающиеся мастера полифонического искусства могут интуитивно чувствовать, пригодна ли данная мелодия для полифонической (и, в частности, канонической) разработки (см., например, Е. Корчинский, 1960).

Мысль о применении вычислительных машин для изготовления заготовок в поэтическом творчестве (например, составление заготовок рифм или полного словаря русских рифм, включая и классические точные, и современные неточные рифмы) не раз высказывалась и в нашей печати (см., например, С. Л. Соболев, 1963; А. М. Кондратов, 1963).

Перебор возможных вариантов (и, следовательно, их подготовка или сочинение) занимает большое место в различных видах творчества — художественном, изобразительном или научном.

Разработка методов комбинирования звуков для получения соответствующих заготовок музыкальных фраз имеет большую историю. Этим, например, занимался еще в XVII веке французский теоретик музыки Марен Мерсенн (Куме, 1972). В своих музыкальных трактатах Мерсенн часто иллюстрирует изложение численными примерами, в частности, из области элементарной комбинаторики. Так, например, Мерсенн изучал закономерности структуры  $8! = 40320$  «песен» — мелодий из восьми нот (высот звуков с одинаковыми длительностями), полученных в результате перестановок. Его интересовали правила искусства комбинировать, которые бы помогли композиторам «делать хорошие песни», поскольку он устанавливал связи выразительных музыкальных средств и приемов композиции с определенными эмоциями.

По-видимому, в стихотворном творчестве машина еще не использовалась для производства заготовок поэтических элементов. В музыке же эта идея оказалась весьма плодотворной. Она реализована в творчестве таких, например, композиторов нетрадиционного направления, как Я. Ксенакис, П. Барбо (А. Моль, 1975), Р. Ружичка (1972, 1980), Л. Аствацатрян (1977) и др.

Использование машинных заготовок пригодно и для получения сочинений традиционной музыкальной системы. На рис. 2.3

приведена музыкальная пьеса, сочиненная итальянским математиком и музыкантом Гальярдо и названная им «Русской песней». Мелодия целиком составлена из заготовок, в качестве которых были использованы отрывки (в основном однотактовые) мелодий, сочиненных ЭВМ «Урал-2» по программе автора этой книги (Р. Х. Зарипов, 1971а). Аккомпанемент составлен формальным

## Э. Гальярдо. «Русская песня»



Рис. 2.3. Музыкальная пьеса, сочиненная Гальярдо, как пример сотрудничества человека и ЭВМ.

способом в соответствии с музыкальной теорией, разработанной Гальярдо (Гальярдо, Форназари, 1978) \*).

Существует мнение, которое можно услышать даже от некоторых специалистов по моделированию на ЭВМ, что если заставить машину долго работать по довольно простой программе, сочиняющей мелодии, то можно получить и превосходные мелодии как результат случайного сочетания звуков. Подобная гипотетическая ситуация была рассмотрена еще французским математиком Э. Борелем в его книге «Случай», где речь шла о миллионе обезьян, печатающих на пишущих машинках тексты наугад, и о вероятности того, что таким путем могут быть получены всевозможные книги, хранящиеся в крупнейших библиотеках мира.

Такой способ может быть полезен для получения практических результатов при сочинении профессиональной музыки, и он используется, как уже было сказано выше, некоторыми композиторами — это метод заготовок вариантов различных фрагментов музыки. Полученные машиной варианты требуют отбора, который производится композитором,— наиболее удачные сочетания он включает в свое произведение. Как и для всякой человеко-машинной системы, этот метод применим для повышения эффективности при получении практических результатов. Для осознания же исследуемого процесса, осознания каждого его этапа более

\* ) В предисловии Гальярдо к книге Р. Х. Зарипова (1979) эта мелодия приводится как пример сотрудничества человека (Гальярдо) и машины («Урал-2») в области сочинения музыки, когда отбор машинных заготовок и изменение в них некоторых нот производятся по усмотрению композитора.

пригоден такой метод моделирования, при котором конечный результат получается машиной без вмешательства человека и где контролируется каждый шаг работы машины.

## § 2.4. Трудности моделирования творческой деятельности

*Принципиальные трудности моделирования интуитивной деятельности. Машине трудно то, что человеку легко. Продуктивная деятельность — пример большой системы. Соблазн создания сложной модели.*

Здесь пойдет речь не о тех технических трудностях моделирования творческой деятельности, которые связаны с недостаточным вниманием к этому кругу проблем или с затруднениями по практическому использованию вычислительных машин специалистами гуманитарного профиля (музыкантами, традиционными психологами, литераторами и т. д.). И даже не о тех препятствиях, которые ставят развитию работ по моделированию творчества и искусству интеллекту некоторые авторы, считающие, что создание искусственного разума есть миф, отнимающий известное количество сил и средств и отвлекающий кибернетику от решения ее прямых задач. Такого рода трудности и препятствия, разумеется, сильно тормозят развитие этих работ. Однако, не являясь принципиальными, они рано или поздно будут преодолены. Здесь уместно напомнить высказывание И. А. Полетаева (И. А. Полетаев, 1971): «Невозможно выключить «рубильник науки». Нельзя прекратить исследования генетического анализа и синтеза, нельзя закрыть Америку. Если человек может открыть Америку, полететь на Луну, синтезировать живое существо, построить мыслящее механическое чудовище, он непременно и неизбежно все это сделает, даже если его не побуждает к этому прямая нужда. Просто — таков человек! Почему он таков — мы не знаем, но узнаем, ибо человек (не этот, так следующий) и это узнать не побоится».

В этом параграфе будут рассмотрены некоторые принципиальные трудности, связанные со спецификой таких объектов моделирования, как интеллектуальные процессы и творческая деятельность. Основная трудность, видимо, заключается в недостаточной изученности (скорее — в полной неизученности) закономерностей механизма интуиции, лежащего в основе этой деятельности.

С этим же связана и недостаточная изученность проблемы понимания в широком смысле, когда имеется в виду не только понимание в диалоге, но и понимание, осознание целей и результатов интеллектуальной деятельности. Отсюда следует и практическая трудность в моделировании творческих процессов (эвристической деятельности и психических функций), заключающаяся в необходимости отыскания и формализации тех элементов творческого процесса, которые свободно и неосознанно реализует человек. В процессе творческой деятельности при решении различных

задач человек обычно не разлагает процесс отыскания решения на элементарные операции, содержащиеся в нем, реализуя многие из них неосознанно и автоматически. Так, он не задумывается, по каким формальным признакам он практически безошибочно отличает на фотографии мужчину от женщины, узнает своих знакомых по внешнему виду, или, разговаривая по телефону, по голосу, успешно выделяя их из множества других людей. Так же неосознанно мы безошибочно отличаем грузинскую мелодию от русской, хотя и не сможем объяснить, каким образом. Любопытно, что это безошибочно делают и те, кто не обладает даже минимальными познаниями в музыке \*).

Для алгоритмизации же и для моделирования на электронной вычислительной машине подобных процессов необходимо внести в программу все сведения об объекте, формализовать все те операции, которые человек обычно совершает интуитивно. Машине необходимо точно и однозначно сообщить все детали и уточнения, все те сведения об объекте исследования, которые на самом деле важны, существенны для успешного решения задачи. В противном случае результат моделирования будет лишен характерных черт исследуемого объекта и будет неадекватен оригиналу.

Существенной трудностью машинного моделирования является также и то, что в силу различия особенностей функционирования машины и человека целый ряд задач, трудных для человека, легко решается машиной, а многие задачи, с которыми человек расправляется шутя, с большим трудом решаются на машине. Так, человек легко читает даже незнакомый почерк — машина, несмотря на многолетнюю упорную работу в этом направлении многих научных коллективов как в нашей стране, так и за рубежом (В. С. Переверзев-Орлов, 1976), пока этого делать не умеет.

Зато, например, при разложении иррационального числа  $\sqrt[3]{2}$  в бесконечную цепную дробь (А. Н. Хованский, 1956)

$$\sqrt[3]{2} = 1 + \cfrac{1}{a_1 + \cfrac{1}{a_2 + \cfrac{1}{a_3 + \dots}}}$$

современная электронная вычислительная машина за считанные минуты позволяет получить несколько тысяч неполных частных  $a_i$  ( $a_i$  — целые положительные числа,  $i = 1, 2, \dots$ ), тогда как необходимость оперировать с большими числами служит препят-

\*) Заметим, что роль и значение отдельных признаков, а также последовательность их проверки при «человеческом» опознании непостоянны, а раз от разу меняются. Так, для узнавания человека иногда существенны походка, внешний облик, прическа, в других случаях — голос, черты лица и т. п. Это, в частности, проверяется простым экспериментом, когда опознавшему предъявляются отдельные части фотографии опознаваемого, на которых отсутствуют те или иные детали. (Прим. ред.)

ствием при вычислении вручную даже нескольких десятков величин  $a_i$ . При получении одной тысячи элементов  $a_i$  ( $i = 1, 2, \dots, 1000$ ) приходится в промежуточных выкладках иметь дело с числами порядка  $10^a$ , где  $a$  примерно равно двум-трём тысячам. Такое число очень велико, и если выписать подряд все его цифры, то оно вряд ли уместится на одной странице печатного текста. И эти числа надо многократно складывать и делить одно на другое.

С аналогичной трудностью встречаются и в музыкальном творчестве. Человек, никогда не обучавшийся музыкальной грамоте, легко может придумать мелодию на заданные стихи — сочинить песню. (Это очень ловко делают даже дети в детском саду.) Составить же программу, по которой бы машина сочиняла мелодии такой же сложности (такой синтаксической структуры), — дело очень трудное. Здесь у человека проявляется интуиция подражания — ведь он сочиняет песню на основе своего прошлого опыта, приобретенного им в качестве слушателя. По-видимому, человек, никогда не слышавший песен, не сможет и сочинить никакой мелодии.

С другой стороны, как показывает практика, гармонизовать мелодию (что делают на занятиях по курсу гармонии в музыкальных училищах или в консерватории) значительно труднее, чем сочинить мелодию. Гармонизация мелодии в общих чертах (на первом этапе обучения) заключается в следующем. Задается мелодия в виде последовательности нот. К каждой ноте мелодии надо подобрать соответствующий аккорд, представляющий собой упорядоченный набор четырех звуков (или голосов, имеющих следующие названия: *сопрано, альт,тенор, бас*). При этом соединение аккордов осуществляется по определенным принципам и правилам, выработанным художественной практикой. Гармонизация мелодии требует знания многих специфических правил и рационального, осознанного применения их при решении таких задач. Интуиция здесь, как правило, не помогает. Составить же программу для вычислительной машины, которая бы хорошо решала задачи по гармонизации, намного легче, чем составить программу для сочинения хороших мелодий\*).

Разные задачи человек решает по-разному, и ему не все равно, как он это делает — осознанно или неосознанно — путем вычислений, расчетов, сравнений или интуитивно, без всяких вычислений. Человеку легче решать задачи без вычислений — например, задачи на подражание, узнавание или распознавание

\*). Так, решения задач по гармонизации мелодии, выполненные машиной «Урал-2» (Р. Х. Зарипов, 1968, 1971а) в соответствии с требованиями, которые предъявляются студентам при выполнении такой работы, были оценены (в 1965 г.) преподавателем Музикального училища В. Н. Холоповой на «отлично», а профессором Московской консерватории С. С. Скребковым — на «хорошо». На оценку этих безошибочных решений в консерватории повлияла повышенная требовательность к «художественности» гармонизации — одной лишь безошибочности здесь оказалось недостаточно.

образов. Для того же, чтобы такие задачи решались на машине, ей нужен алгоритм — система однозначных и точных предписаний, далеко не всегда известная человеку.

Говоря о трудностях такого рода при моделировании жизненных процессов, И. А. Полетаев в одном из своих выступлений (на конференции «Математическое моделирование жизненных процессов», Москва, 17—18 марта 1966 г.) сказал: «Если хотите убедиться, что вы плохой специалист (психолог, биолог, социолог и т. п.), попытайтесь сделать хорошую модель. Увидите, как вы плохо знаете предмет».

Сложная деятельность (психическая, эвристическая, продуктивная) внешне часто представляется простой лишь потому, что в ней незаметно, не обнаруживая себя, вступает в действие механизм интуиции — подражания или узнавания, до сих пор изученный очень слабо. Простой же эта деятельность кажется из-за того, что в ней используется мало правил, либо их вообще нет (как при узнавании друзей по их голосам). Но правила всегда нужно применять осознанно — по ним надо вычислять, а это — неестественное и некомфортное занятие для человека. Поэтому они всегда заметны, и чем меньше правил используется в продуктивной (эвристической) деятельности человека, тем она кажется ему проще и легче.

И лишь при построении модели такой деятельности, при ее формализации и машинном моделировании выясняется, как мало мы о ней знаем и как много делается по интуиции при ее ручной, или субъективной реализации.

Воспроизводя (моделируя) объект исследования и совершая его модель, мы шаг за шагом проникаем в суть объекта, познаем его существенные, характерные свойства, попутно убеждаясь в несущественности других его свойств или признаков (которые прежде казались существенными). Говоря образно, мы можем до конца понять лишь тот мир, который строим сами.

Специфика самого метода моделирования на ЭВМ и рассмотренные выше трудности моделирования требуют на первых порах ограничиваться наиболее простыми синтаксическими структурами объекта исследования для выявления принципиальных, наиболее существенных сторон как самого метода моделирования, так и изучаемого объекта. В этом тоже заключена определенная трудность, так как при исследовании какого-либо объекта с помощью электронной вычислительной машины, как показывает практика, всегда есть большой соблазн сразу же получить сложный машинный результат. В данном же случае поддаться соблазну — не лучший способ его преодолеть.

Так, при моделировании музыкальных сочинений некоторые программисты, не имея предварительной подготовки в исследовании музыки, начинали моделирование с вальсов Штрауса. Это очень сложная структура, особенно для начипающих, поэтому

неудивительно, что все их попытки (без исключения) постигла неудача: ни в одном случае не было даже закончено составление программы. Наступившее разочарование навсегда отбило у авторов этих программ охоту заниматься подобным делом.

Как показывает опыт моделирования сложных систем, целесообразнее начинать исследовать не весь объект в целом, не всю сложную систему, а его фрагменты, отдельные его стороны или явления, т. е. строить эскизные модели объекта. Все это на первых этапах неизбежно приводит к схематизации, определенному упрощенчеству (часто намеренному, сознательному) в постановке и решении задач, но позволяет получить полезные результаты и использовать их при решении более сложных задач.

## § 2.5. Иерархичность структуры

*Иерархичность структуры — компонент эвристической деятельности. Иерархия понятий. Иерархия уровней определения понятий. Моделирование понятий — сведение высоких уровней к низшему. Разнобой в терминологии — причина взаимонепонимания. Пример иерархической структуры деятельности и ее продукта: плетение кружев.*

Важной особенностью, которую необходимо учитывать при моделировании творческой деятельности, имеющей и эвристические составляющие, является тот факт, что при этом приходится иметь дело с понятиями, которые могут образовывать сложные иерархические структуры. Будем различать *иерархию понятий* и *иерархию уровней определения понятий*.

*Иерархия понятий* представляет собой разбиение некоторого понятия  $p$  на ряд более простых понятий  $p_k^i$ , с помощью которых оно

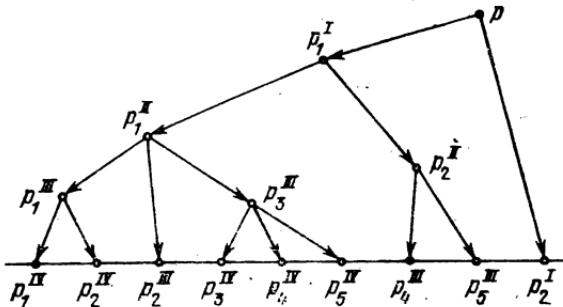


Рис. 2.4. Схема ассоциативных связей иерархии понятий.

может быть выражено. Пример такого разбиения изображен на рис. 2.4. Здесь понятие  $r$  выражается в конечном счете с помощью девяти понятий различных уровней, что можно записать в виде

$$p = p(p_1^{\text{IV}}, p_2^{\text{IV}}, p_3^{\text{III}}, p_4^{\text{IV}}, p_5^{\text{IV}}, p_{4+}^{\text{III}}, p_{5+}^{\text{III}}, p_2^{\text{I}}),$$

где по мере увеличения детальности рассмотрения (увеличения  $i$ )

понятие более низкого уровня (с большим  $i$ ) определяется с помощью еще более низких по иерархии понятий:

$$\begin{aligned} p &= p(p_1^I, p_2^I), \\ p_1^I &= p_1^I(p_1^{II}, p_2^{II}), \\ p_1^{II} &= p_1^{II}(p_1^{III}, p_2^{III}, p_3^{III}), \\ p_2^{II} &= p_2^{II}(p_4^{III}, p_5^{III}), \\ p_1^{III} &= p_1^{III}(p_1^{IV}, p_2^{IV}), \\ p_3^{III} &= p_3^{III}(p_3^{IV}, p_4^{IV}, p_5^{IV}). \end{aligned}$$

Заметим, что связи между составляющими понятиями, с помощью которых выражается (определяется) понятие  $p$ , могут быть различными (логическими, смысловыми, ассоциативными), а сами составляющие понятия и связи между ними отражают свойства исходного понятия  $p$ .

На самом деле в творческой (эвристической) деятельности, особенно относящейся к области художественной культуры, дело обстоит значительно сложнее. В процессе этой деятельности человек оперирует понятиями и представлениями (образами), часто весьма далекими от идеала логической строгости. Здесь затруднительно говорить о доказательствах или определениях (раскрытии содержания понятий), т. е. о тех средствах, которые в научной деятельности приводят к установлению логических (и смысловых) связей между суждениями и понятиями и, таким образом, структурируют научное знание. Здесь типичен скорее случай, когда некоторое понятие (идея, образ) не может быть выражено или определено через другие, более простые понятия. Таким образом, в указанных сферах деятельности далеко не всегда может быть установлена четкая иерархия понятий, подобная изображенной на рис. 2.4. Однако при этом сохраняется, правда, более эластичная и менее четкая иерархия, которую мы определим как *иерархию уровней определения понятий*, т. е. как структуру, позволяющую оценить степень раскрытия содержания понятий.

Поясним теперь, как может строиться такая иерархия уровней определения понятий. В любой сфере деятельности человека имеются свои исходные очевидные и однозначные понятия  $p_0$ , не нуждающиеся в определениях. Назовем их *элементарными понятиями*. Гораздо больше, однако, в каждой из этих же сфер деятельности сложных, неэлементарных понятий, идей, образов, которые могут по-разному выражаться через другие понятия.

Так, в примере, приведенном на рис. 2.5, сложное понятие  $p_n$  может выражаться (определяться) через такие другие понятия, каждое из которых в конце концов можно выразить через элементарные понятия  $p_0$ . В этом случае естественно говорить, что  $p_n$  — это понятие *нижнего* уровня определения иерархии понятий,

и между  $p_n$  и элементарными понятиями  $p_0$  можно установить определенные смысловые связи.

Если же сложное понятие  $p_v$  выражается через другие понятия, из которых не все выразимы через элементарные, то смысловые связи между  $p_v$  и элементарными понятиями  $p_0$  будут неполными. В этом случае имеющихся логических (семантических, ассоциативных) связей понятия  $p_v$  с понятиями  $p_0$  недостаточно для раскрытия его содержания. Такое понятие  $p_v$ , будет принадлежать к более высокому уровню определений. Практически это

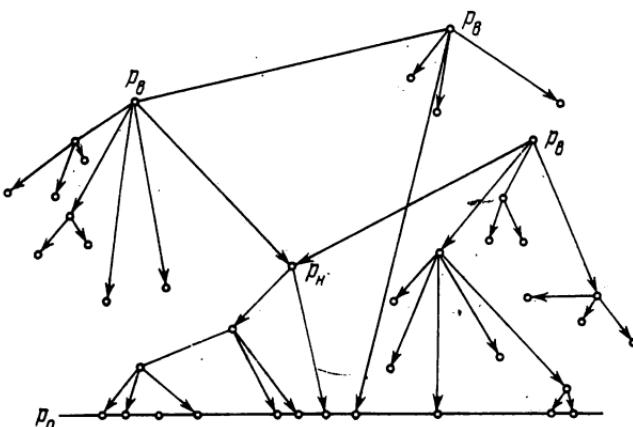


Рис. 2.5. Схема ассоциативных связей понятий разных иерархических уровней определения:  $p_0$  — уровень элементарных понятий,  $p_n$  — понятия низшего уровня,  $p_v$  — понятия высокого уровня.

означает, что в понимании понятия  $p_v$  имеется некоторая, возможно, значительная доля произвола. Каждый субъект (может быть, неосознанно) «достраивает» недостающую систему смысловых связей за счет своих индивидуальных ассоциаций. Вследствие этого одному и тому же слову (или знаку), обозначающему какое-то понятие, разные лица придают и различный смысл. В этом же, по-видимому, кроется причина разнобоя в терминологии и многочисленных терминологических споров, так как при отсутствии точных определений в одни и те же слова вкладывается разный смысл.

Высокие уровни определения понятий широко распространены в системах знаний или деятельности, не использующих точные методы исследования, например, в традиционной психологии, музыковедении, литературоведении. Высший уровень — уровень общих ассоциаций, когда понятия вообще не определяются, — характерен для художественного творчества. Противоположный же ему — низший уровень определений — принят в математике, в наибольшей степени подвергшейся логической формализации (формальные определения понятий).

Разумеется, не следует стремиться во всех случаях пользоваться лишь низшим уровнем определений; для житейских потребностей, да и для многих задач в науке, наш обиходный, естественный язык, используемый на уровне общих ассоциаций, вполне приемлем. Несмотря на неоднозначность, он имеет то преимущество, что не требует громоздких построений, сети логических, ассоциативных и других связей, сводящих данное понятие к понятиям низшего уровня. Да и не всегда это возможно в силу самой природы системы знаний или деятельности.

Заметим также, что неоднозначность используемых понятий имеет большое значение для процесса творчества и для развития языка, позволяя в большей степени использовать различные неожиданные ассоциации и формировать на их основе новые содержательные понятия (В. В. Налимов, 1974). С другой стороны, в процессе формирования научных знаний при развитии той или иной предметной области, относительно замкнутой, идет процесс непрерывного уточнения и формализации используемых понятий, процесс понижения уровня их иерархии.

С таким же процессом снижения уровня иерархии рассматриваемых понятий мы сталкиваемся и при моделировании, поскольку ЭВМ может успешно оперировать главным образом с понятиями низшего уровня. При этом важно отметить, что в процессе понижения уровня иерархии понятий ЭВМ играет весьма существенную роль. Действительно, как следует из вышеизложенного, ручное сведение понятий высоких уровней к более низким всегда имеет субъективный характер и может привести к неадекватным и противоречивым результатам. Использование ЭВМ позволяет, во-первых, обозреть большое количество понятий и выявить противоречия в их субъективных определениях, а во-вторых, дает возможность в процессе моделирования по его промежуточным и конечным результатам установить адекватность моделируемого понятия или системы понятий той «понятийной конструкции», которая воплощена в соответствующей программе ЭВМ и результатах ее функционирования.

Иерархичность структуры — один из существенных компонентов как самой эвристической, продуктивной деятельности, так и ее результатов. Иерархичность структуры сложного продукта человеческой деятельности тесно связана с иерархичностью структуры самой деятельности, что определяет и характер иерархичности понятий, относящихся к этой деятельности.

Покажем это на наглядном примере сложноорганизованного процесса — плетения кружев на коклюшках. Такие кружева не вяжут и не вышивают, а именно плетут; например, так называемые вологодские или русские кружева (И. П. Работникова, 1956; М. Рехачев, 1955, а также альбом С. А. Давыдовой, 1892). Кружева плетут деревянными палочками, *коклюшками*, с намотанными на них нитями. Изготовление сложных кружев с разнооб-

разными рисунками требует довольно много — несколько десятков или даже сотен — коклюшек (о плетении кружев см., например, А. К. Галактионова, 1948; К. В. Исакова, 1958). Кружева плетутся

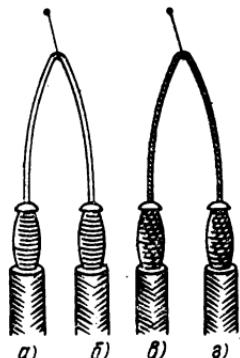


Рис. 2.6. Две пары коклюшек, находящихся в данный момент в работе при плетении кружев: *аб* и *вг* — крайние пары, *бв* — средняя пара.

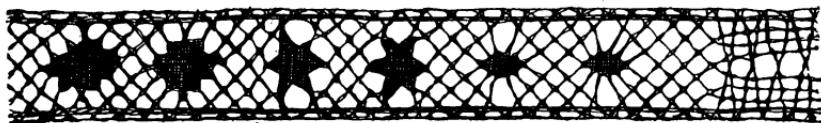


Рис. 2.7. Образец мерного, или многопарного, кружева.

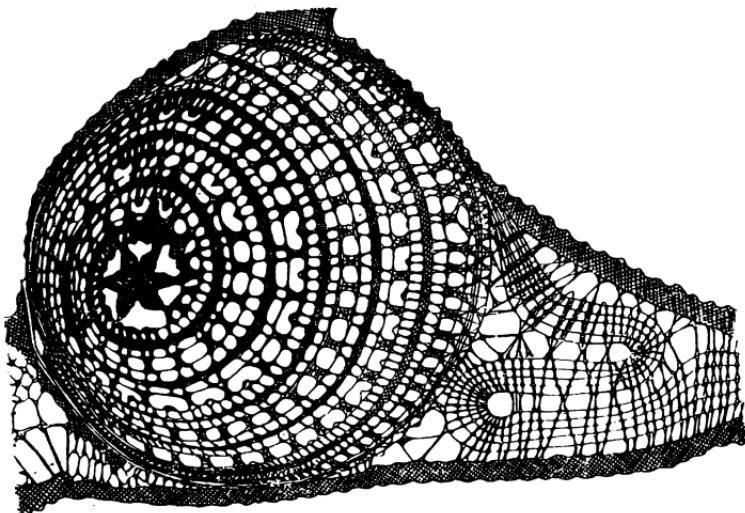


Рис. 2.8. Фрагмент сцепного кружевного изделия.

так, что в данный момент в работе находятся лишь две пары коклюшек — *аб* и *вг* (рис. 2.6). Отсюда *аб* и *вг* — крайние пары, а *бв* — средняя пара.

На рис. 2.7 и 2.8 изображены образцы плетеных кружев. Здесь все разнообразие узоров, рисунков и фактуры кружев с различными элементами — полотнянкой, сеткой, решеткой из плетешков, звездочкой из лепестков (насновок), паучками и т. п.— сводится в конце концов лишь к выполнению *двух* простейших операций, осуществляющих переплетение нитей. Эти исходные операции, показанные схематически на рис. 2.9, состоят из вращения на пол-оборота влево (против часовой стрелки) крайней

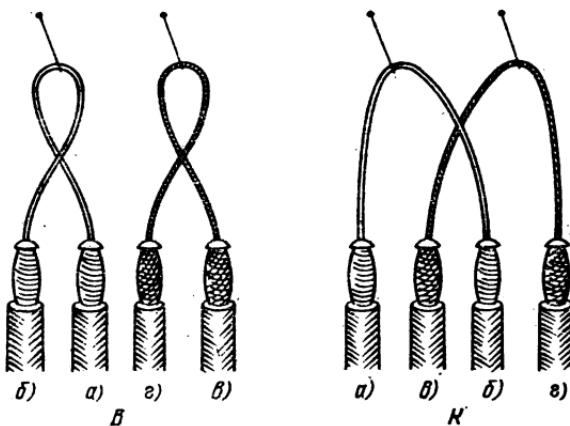


Рис. 2.9. Простейшие операции плетения кружев: *B* — вращение, *K* — перекрещивание.

пары коклюшек и вращения на пол-оборота вправо (по часовой стрелке) средней пары коклюшек или проще — *вращения и перекрецивания*.

Различные комбинации в последовательности этих простейших операций при плетении порождают более сложные основные элементы кружев — полотнянку, сетку, плетешок, овальную насновку (лепесток), петельки, паучки и т. п. Некоторые из них показаны на рис. 2.7 и 2.8. Комбинации и вариации основных элементов образуют разнообразные кружевые узоры и орнаменты. С этими основными элементами, по существу, и имеет дело опытная кружевница, не разделяя процесс плетения кружев на более простые и элементарные операции.

Рисунок, орнамент или узор кружева во многих случаях выплетается последовательно — строка за строкой. Для каждого основного элемента требуется определенное число строк и определенное число простейших операций (вращений и перекреций), выполненных в той или другой комбинации. В конце каждой строки производится ее фиксирование — закрепление нитей либо на булавке (вколотой в подушку, на которой плетутся кружева), либо путем сцепки с готовой частью кружева (сцепка производится с помощью обычного вязального крючка). После

закрепления конца строки выплется следующая строка уже в обратном направлении. Кружева с использованием сцепки называются сцепными (см. рис. 2.8), в отличие от мерных (см. рис. 2.7), или многопарных, не использующих сцепку. Сцепные кружева значительно разнообразнее и синтаксически сложнее. Техника сцепного плетения представляет большие возможности для творческой фантазии кружевницы (точнее — художницы, разрабатывающей рисунок этих кружев).

Мы видим, что рассмотренный процесс плетения кружев также имеет дело с некоторой иерархической системой, в которой высшему уровню иерархии соответствует рисунок кружева, распадающийся на систему (совокупность) элементов, каждый из которых в свою очередь распадается на последовательность простейших операций, выполняемых построчно.

Мы уже отмечали, что в процессе плетения кружевница, выполняя исходную последовательность простейших операций механически и не задумываясь о их числе и порядке, имеет дело с более сложными понятиями. Нетрудно, однако, показать, что процедура плетения кружев может быть строго формализована и записана в виде четкого алгоритма (программы). Покажем это.

Так как плетение кружева сводится к двум операциям — вращению и перекрещиванию, их можно обозначить, или закодировать, определенными знаками, например цифрами 0 и 1 соответственно. Тогда любое кружево — любой его узор или орнамент и любой элемент — можно выразить строго определенной последовательностью нулей и единиц, отнесенных к соответствующим парам нитей или коклюшек. Таким образом, можно закодировать как само кружево, так и процесс его плетения.

При таком способе кодирования любой более сложный элемент кружева, расположенный на верхних уровнях иерархической системы, может быть выражен некоторым кодом. Так, например, полотнянка и некоторые другие виды основных элементов кружева будут характеризоваться числом пар нитей ( $n$ ) и числом строк ( $m$ ), где каждая строка представляет собой числовой набор (код).

Параметры  $m$  и  $n$  характеризуют конкретные размеры данного элемента и могут меняться от кружева к кружеву, а кодовый набор, характерный именно для полотнянки, будет постоянным и играет роль стандартной программы с параметрами  $m$  и  $n$ , подобной в известном смысле стандартным программам решения задач с переменными параметрами  $m$  и  $n$  на ЭВМ. Имея систему таких программ  $\{A_k(m, n)\}$ , можно выразить структурно более сложный объект, например рисунок или орнамент кружева  $R$ , в виде упорядоченной последовательности этих элементов \*):

$$R = \{A_{k_1}(m_1, n_1), A_{k_2}(m_2, n_2), \dots, A_{k_i}(m_i, n_i), \dots\},$$

\*). В ряде случаев процесс плетения оказывается структурно более сложным.

где  $A_k$  —  $k$ -й тип основного элемента кружева;  $n_i$ ,  $m_i$  — число пар нитей и строк в  $i$ -м элементе кружева.

Таким образом, на базе иерархической структуры понятий как для самого кружева, так и для процесса его плетения могут быть формально описаны эта процедура и получающееся при ее реализации кружево.

При разработке алгоритма, описывающего деятельность кружевницы, следует учитывать то обстоятельство, что в процессе работы кружевница, как правило, не производит вычислений — они ей чужды, некомфортны по самой природе ее деятельности. Поэтому алгоритм должен быть таким, чтобы вычислительные операции в нем отсутствовали, заменяясь теми логическими операциями (достижение края, конца строки или последней строки и др.), которые кружевница обычно выполняет, скорее всего, не задумываясь о них.

Перейдем к рассмотрению алгоритма, описывающего процесс выплетания некоторых видов основных элементов кружева, которые объединяет строчная структура процесса, т. е. тот распространенный в практике кружевоплетения случай, когда элемент кружева выплется построчно — строка за строкой.

Введем необходимые понятия.

*Исходное положение.* На специальной подушке (бубне) слева направо последовательно одна за другой расположены  $n$  пар нитей  $D_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ;  $n \geq 1$ ), которые называются *долевыми парами*. Левее или правее всех долевых пар, с левого или правого края расположена пара  $X$ , называемая *ходовой парой*.

Как уже было сказано выше, в основе кружевоплетения лежат две элементарные операции — вращение и перекрецывание.

Перекрецывание выполняется двумя парами нитей, как показано на рис. 2.9; обозначим эту операцию буквой  $K$ .

Вращение выполняется как одной парой нитей, так и двумя (см. рис. 2.9), поэтому будем различать эти два случая, обозначая вращение одной парой через  $B^1$ , а двумя парами — через  $B$ .

Однократное выполнение определенного сочетания элементарных операций, в результате которого ходовая пара переплетается с одной из долевых, образует элементарное переплетение ( $\mathcal{EP}$ ). Примеры элементарных переплетений:  $BK$ ,  $KBK$ ,  $BKBK$  и др.\*).

Ходовая пара  $X$ , двигаясь в одном направлении (влево или вправо) и переплется по формуле элементарного переплетения  $\mathcal{EP}$  с каждой из последовательно расположенных долевых пар нитей  $D_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) по одному разу, перемещается с одного

\*). В литературе, посвященной плетению кружев, операция  $B$  называется *перевить*, а  $K$  — *сплести*. Элементарное переплетение  $BK$  называется *в ползаплета*, или *сплести один раз*, а  $BKBK$  — *в полный заплет*, или *сплести два раза* (см., например, А. К. Галактионова, 1948; К. В. Исакова, 1958).

края всех долевых нитей на другой, образуя строку элементарных переплетений. Строки выплетаются последовательно одна за другой — сначала в одном направлении до достижения крайней долевой пары, затем, после закрепления края выполненной строки булавкой, в обратном направлении.

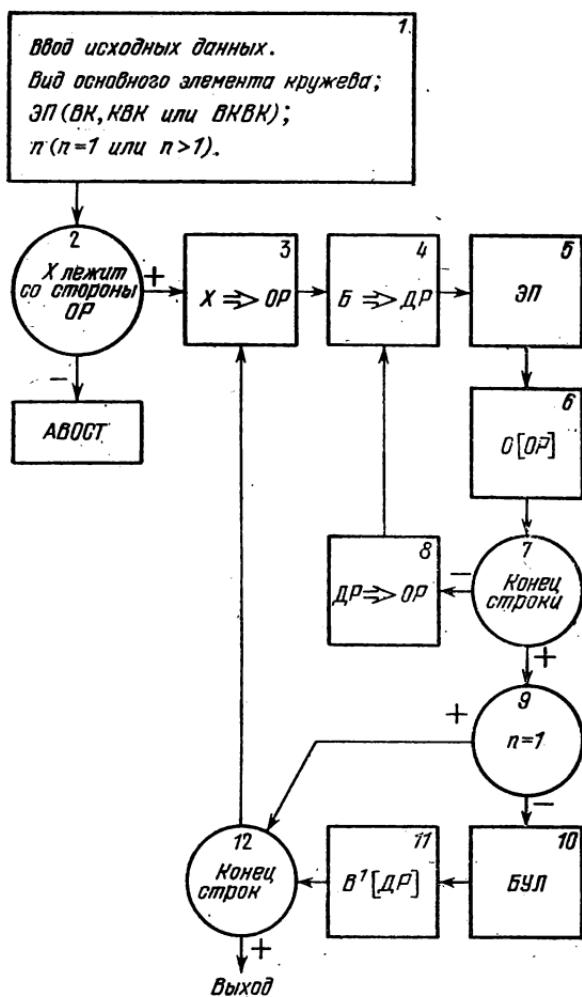


Рис. 2.10. Блок-схема алгоритма выплетания основных элементов кружева строчной структуры.

Последовательность строк образует основной элемент кружева. Его фактура определяется элементарными переплетениями ЭП. Примеры основных элементов кружева — плетешок, полотнянка, сетка, насыпка и др.

Из основных элементов, взятых в различных вариациях, образуются разнообразные кружевные узоры.

На рис. 2.10 изображена блок-схема алгоритма деятельности кружевницы при выплете некоторых основных элементов кружева строчной структуры.

**Описание функций узлов блок-схемы.** Кружками обозначены логические блоки, проверяющие выполнение некоторого условия и имеющие два выхода. В случае выполнения условия управление передается по стрелке со знаком +, в противном случае — по стрелке со знаком -. Нелогические блоки обозначены квадратиками или прямоугольниками. Введем обозначения:

$n$  — количество долевых пар нитей или коклюшек;

$\mathcal{E}P$  — элементарное переплетение;

$X$  — ходовая пара;

$OP$  — одна рука, левая или правая;

$DP$  — другая рука, отличная от  $OP$ ;

$B$  — ближайшая к ходовой долевая пара;

$O[OP]$  — опускание пары нитей из руки  $OP$  на подушку;

$B^1[DP]$  — элементарная операция вращения, выполняемая парой коклюшек в  $DP$ ;

$\Rightarrow$  — знак засылки; запись  $I \Rightarrow II$  означает засылку (взятие), а также перекладывание пары нитей (коклюшек) I в руку II;

$БУЛ$  — вкалывание булавки для закрепления изготовленного фрагмента кружева.

Заметим, что при выполнении операций  $O[OP]$  и  $I \Rightarrow II$  порядок взаимного расположения нитей в паре не меняется.

**Блок 1.** Ввод исходных данных: вид основного элемента кружева, элементарное переплетение  $\mathcal{E}P$ , которым выплется этот элемент, количество долевых пар нитей  $n$ .

При выплете того или другого основного элемента кружева внимание фиксируется на применяемом элементарном переплетении, постоянном для этого элемента. Кроме того, важно, сколько долевых пар — одна или больше — при этом используется. Так, для выплетания плетешка нужна всего одна долевая пара (кроме ходовой). Для выплетания других основных элементов кружева их требуется больше; сколько — неважно, так как в процессе работы они не пересчитываются: это занятие для кружевницы не-привлекательно, неудобно, и оно не отражено в схеме алгоритма.

**Блок 2.** Условие: ходовая пара нитей  $X$  расположена левее самой левой или правее самой правой долевой нити, т. е. со стороны какой-либо руки  $OP$  (левой или правой) от  $X$  нет ни одной долевой пары  $D$ .

При невыполнении условия (из-за перепутывания нитей или других возможных причин) — переход к  $ABОСTу$  — аварийному останову.

В блоках 3—11 выплется одна строка элементарных переплетений, в результате чего ходовая пара  $X$  переплется с каждой из всех долевых пар по одному разу.

**Блок 3.** Ходовая пара  $X$  берется в руку  $OP$ . Если  $X$  уже находится в руке (по завершении предыдущего цикла выплетания строки эта рука была обозначена  $DP$ ), то таким образом меняется обозначение руки — в начале нового (текущего) цикла этой руке присваивается символ  $OP$ .

**Блок 4.** Долевая пара  $B$ , ближайшая к паре в руке  $OP$  (ходовой) со стороны  $DP$ , берется в другую руку ( $DP$ ). При этом для блока 6 запоминается то место между соседними долевыми парами, откуда она была взята.

**Блок 5.** Выполнение элементарного переплетения  $\mathcal{EP}$ . Находящаяся в руке  $OP$  ходовая пара  $X$  переплется с очередной долевой парой в руке  $DP$ , в результате чего долевая пара из  $DP$  переходит в  $OP$ , а ходовая пара — в  $DP$ .

**Блок 6.** Долевая пара нитей из руки  $OP$  опускается на то место, откуда в блоке 4 была взята долевая пара  $B$  до выполнения элементарного переплетения в блоке 5.

Заметим, что напрашивавшееся вместо приведенного выражение «опускается на ее прежнее (первоначальное) место» имеет смысл только в случае выплетания полотнянки и ее разновидностей; при выплете же сетки нити перепутывают и берут из разных пар.

**Блок 7.** Условие: конец строки, переплетеи последняя долевая пара. Иначе говоря, от находящейся в руке  $DP$  пары со стороны  $DP$  нет ни одной долевой пары  $D$ .

**Блок 8.** Перекладывание пары нитей из руки  $DP$  (ходовой) в руку  $OP$ .

**Блок 9.** Условие: в выплете основного элемента кружева занята лишь одна долевая пара, не считая ходовой. Это происходит при изготовлении плетешка.

**Блок 10.** Вкалывание булавки ( $BUL$ ) в отмеченную на рисунке кружева (сколке) точку, расположенную между парой нитей в руке  $DP$  (ходовой) и крайней долевой парой, ближайшей к  $DP$  со стороны руки  $OP$ .

**Блок 11.** Элементарная операция «вращение»  $B^1$  одной пары нитей, находящейся в руке  $DP$  (ходовой).

**Блок 12.** Условие: выплетеи последняя строка текущего основного элемента кружева. При невыполнении условия — переход к блоку 3 для начала выплетеия следующей строки.

При выплетеия некоторого вида основного элемента кружева обычно используется лишь одно элементарное переплетеие  $\mathcal{EP}$ , выполняемое ходовой парой с каждой из долевых пар в каждой строке. Варьирование значений параметров алгоритма (его исходных данных) приводит к разнообразию основных элементов кружева, что широко применяется в кружевоплетеии.

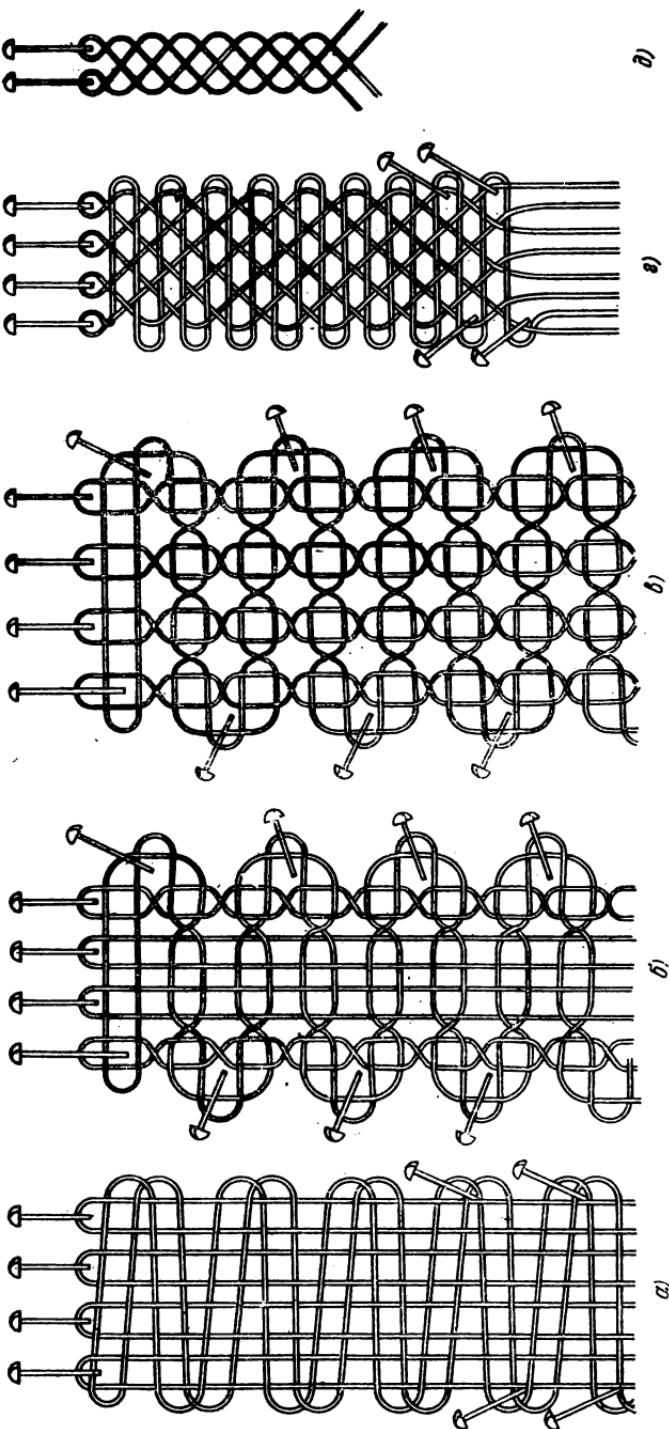


Рис. 2.11. Варианты основных элементов кружева сточной структуры: полотнянка (а), полотнянка с отвивными крайними долевыми парами (б), сетка (с), сетка в перевив пар (д), плетенок (е).

Покажем это на примерах.

Так, если при  $n > 1$  в блоке 5 выполняется элементарное переплетение ЭП по формуле ВК однократно, то результатом работы алгоритма будет основной элемент сетка (рис. 2.11, г). Если же оно выполняется двукратно (или, что то же самое, однократно выполняется элементарное переплетение КВК), то — полотнянка в перевив пар (рис. 2.11, в). При  $n = 1$  и однократном выполнении того же элементарного переплетения ВК получается плетешок (рис. 2.11, д).

При  $n > 1$  и однократном выполнении элементарного переплетения КВК получается полотнянка (рис. 2.11, а).

В кружевоплетении обычно используется не основной элемент кружева в чистом виде, а его видоизменения, одно из которых рассмотрим на примере полотнянки. Полотнянка — главный из основных элементов кружева, и ее различные вариации используются во многих кружевых узорах. Одной из распространенных модификаций является полотнянка с отшивными крайними долевыми парами (рис. 2.11, б), отличающаяся от обычной полотнянки ажурной кромкой.

Чтобы рассмотренный алгоритм описывал и такую разновидность полотнянки, вместо блока 5 в схеме на рис. 2.10 следует использовать последовательность блоков, приведенную на рис. 2.12, в которых происходит отшивание кромки.

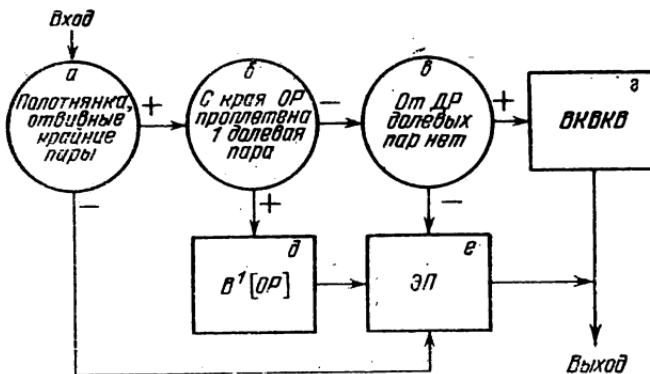


Рис. 2.12. Последовательность операций, приводящих к отшиванию кромки полотнянки.

Рассмотрим функции узлов этой схемы.

Блок а. Условие: основным элементом кружева является полотнянка с отшивными крайними долевыми парами. В этом случае, как и при выплетеании обычной полотнянки, элементарное переплетение ЭП производится по формуле КВК в блоке е.

При невыполнении условия — переход к блоку е.

Блок б. Условие: с края, находящегося со стороны руки ОР, проплещена одна долевая пара.

**Блок в.** Условие: от пары в руке  $DP$  со стороны  $DP$  нет ни одной долевой пары.

**Блок г.** Выполнение переплетения  $BKBKB$ . В результате этого текущая строка (точнее — ходовая пара, выплатающая ее) отвивается от предыдущей и последующей строк, а крайняя долевая пара в текущей строке — от соседней долевой пары. Кроме того, ходовая и крайняя долевая пары переплетаются по формуле переплетения пар в обычной полотнянке —  $KBK$ , а к вращению на пол-оборота вокруг булавки, выполняемому в блоке 10, здесь добавляется еще пол-оборота.

**Блок д.** Вращение  $B^1$  одной пары нитей, находящейся в руке  $OP$  (ходовой). В результате этого в текущей строке крайняя долевая пара отвивается от соседней долевой пары.

**Блок е.** Выполнение элементарного переплетения  $\mathcal{EP}$ .

Тот или иной  $k$ -й тип основного элемента кружева определяется значениями числа долевых пар  $n$  и элементарного переплетения  $\mathcal{EP}$ , которые формируют программу  $A_k$ .

Процесс плетения кружев представляет собой редкий пример сложноорганизованной продуктивной деятельности, которая благодаря иерархичности ее структуры легко сводится к наименьшему возможному числу (двум) простейших операций. Это справедливо и по отношению к продукту такой деятельности — кружевам, строение которых имеет такую же сложную иерархическую структуру.

## § 2.6. Переход от слабой модели к сильной

*Совершенствование модели — уточнение определений. Путь исследования сложных систем — переход от слабой модели к сильной.*

Существенным достоинством моделирования с использованием ЭВМ является возможность непрерывного, практически неограниченного совершенствования модели, ее приближения к оригиналу с любой необходимой, практически допустимой или достижимой степенями точности. Последние определяются следующими факторами:

а) техническими — ограниченным объемом памяти машины; временем, отводимым на решение задачи; стоимостью программирования и решения задач и др.;

б) содержательными — целями моделирования и уровнем знаний об объекте моделирования и возможностями проверки на этом уровне результатов и выводов, полученных при моделировании.

После прохождения цикла моделирования по результатам сравнения модели с объектом (рис. 2.13) осуществляется корректировка модели (переход к более сложной модели), после чего снова производится моделирование. Этот циклический процесс мо-

жет повторяться несколько раз до получения достаточно сильной модели, обеспечивающей практически достижимую точность.

Корректировка, совершенствование модели может осуществляться разными путями. Во-первых, в процессе такой корректировки могут изменяться значения и диапазоны изменения начальных параметров, а также их число. При этом сама модель (программа) остается неизменной. Во-вторых, результаты сравнения могут привести к необходимости уточнения основных понятий и положений, использованных при построении модели, к установлению новых, более полных и глубоких связей и соотношений между ними и, следовательно, между различными элементами модели. Это ведет к усовершенствованию самой модели, устраниению упрощений, схематичности, которые всегда, как правило, имеют место в начальном варианте модели. В этом, собственно, и заключается процесс постоянного усиления модели, переход от схематического (слабого) моделирования к более точному (сильному) моделированию, отражающему существенные стороны объекта исследования.

Заметим, что такой поэтапный процесс моделирования не только оказывается более удобным, позволяя попутно устранить ошибки, возникшие при программировании и отладке, но и имеет большое познавательно-методическое значение, позволяя выделить наиболее существенные характеристики модели и объекта, влияющие на те или иные особенности функционирования этого объекта.

Последний факт имеет особенно большое значение для успешного исследования объектов, плохо приспособленных для формализации (например, эвристической деятельности). Здесь часто даже первые схематичные модели позволяют выявить нечеткость и расплывчатость существующих представлений об объекте и перейти к более четким определениям и гипотезам.

Такое последовательное моделирование позволяет также выявить ряд локальных трудностей исследования, связанных не только с недостаточной изученностью объекта моделирования, но и с рядом особенностей программирования и ввода в ЭВМ информа-

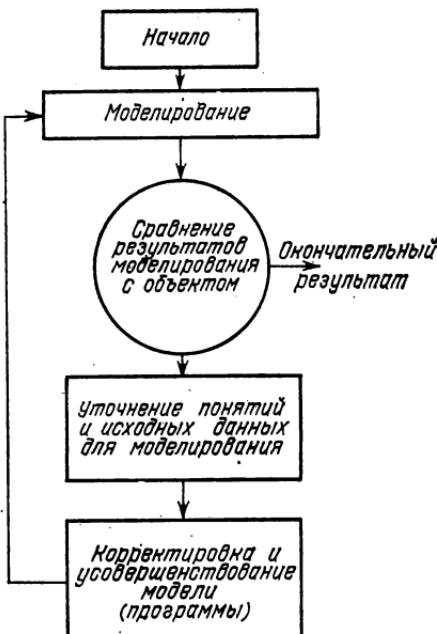


Рис. 2.13. Схема процесса совершенствования модели.

ции о сложных, нечетко формализованных объектах, и тем самым наметить дальнейшие пути исследования. Так, например, работы по моделированию некоторых задач, связанных с проблемой искусственного интеллекта, привели к интенсификации исследований в области языка и лингвистики и к созданию специализированных формальных языков, специально приспособленных для описания этих задач.

Пример алгоритмического музыкально-ориентированного языка — язык МИР, разработанный американским математиком и музыкантом Касслером (М. Касслер, 1975). МИР — это язык программирования и одновременно язык для поиска музыкальной информации (MIR — Musical Information Retrieval), вследствие чего выражение некоторой теоретико-музыкальной функции на языке МИР служит в то же время и машинной программой для вычисления ее значений.

МИР предназначен в основном для музыкантов-теоретиков, использующих ЭВМ при анализе музыки. Необходимая для исследования музыкальная информация вводится в ЭВМ; для контроля правильности ввода музыки предусмотрено пробное прослушивание ее с помощью звукового выхода ЭВМ и специальной программы, предназначеннной для электронного синтеза музыки, записанной на перфокартах. Посредством языка МИР записывается соответствующая программа, учитывающая разные стороны музыки, введенной в машину. Поиск музыкальной информации заключается в извлечении из большой совокупности музыкальных данных некоторой их части, отвечающей определенным музыковедческим требованиям. Результаты работы программы получаются в форме, понятной музыкантам.

Подобные языки могут оказать помощь музыковеду-теоретику в процессе формирования разрабатываемой им теории. Музыковед имеет возможность получить экспериментальный фрагмент теории, выраженный на таком языке, и, следовательно, может автоматически выяснить, является ли его фрагмент теории правильным для соответствующих отрывков из музыкальных произведений.

### § 2.7. Марковские цепи в машинной музыке

*Модель нотного текста в виде цепи Маркова. Элемент марковской цепи, отражающий интервально-метрическую сторону музыки.*

Известны два способа моделирования музыкальных сочинений на ЭВМ — метод марковских цепей и процедурный (или структурный) метод. Процедурный метод будет подробно рассмотрен в последующих главах. Здесь же метод марковских цепей в том виде, в каком он применяется в основном в экспериментах зарубежных исследователей, рассматривается в связи с принципом переноса инвариантных элементов. Кроме того, предлагается элемент

марковской цепи более сложной структуры, отражающей интервально-силовую (интервально-метрическую) сторону мелодии.

Понятие о марковской цепи как важном случае марковского процесса \*) возникло в связи с литературоведческими исследованиями: поэтический текст как цепь Маркова был впервые рассмотрен математиком А. А. Марковым, изучавшим структуру «Евгения Онегина» А. С. Пушкина, чему посвящена основополагающая его статья (А. А. Марков, 1913).

Шенноном была предложена простая модель для нотного текста (К. Шеннон, 1953), по существу отражающая его статистическую структуру. Он предложил моделировать нотный текст (точнее, его звуковысотную линию) в виде стационарной цепи Маркова \*\*). Однако любая модель некоторого объекта характерна тем, что она не отражает адекватно всех его свойств. Так и модель нотного текста, пригодная для исследования его статистических свойств, может быть неудовлетворительной для представления ее, например, в качестве музыкального сочинения, которое должно обладать кроме статистических и другими характеристиками, свойственными первоначальному нотному тексту. Именно так случилось с машинными моделями мелодий, полученными методом марковских цепей в экспериментах зарубежных исследователей.

Этот метод заключается в следующем. Сначала в машину вводится некоторое количество мелодий, отыскиваются все  $n$ -нотные сочетания, возможные в данных мелодиях, и производится их статистический анализ. (Под нотой здесь подразумевается высота ноты.) В результате получается матрица переходных вероятностей, или *матрица перехода*. Ее элементами служат значения вероятностей, с которыми любое из  $(n - 1)$ -нотных сочетаний, возможных в данных мелодиях, комбинируется с последующей  $n$ -й нотой в  $n$ -нотных сочетаниях.

Далее производится синтез мелодий. Из всех  $n$ -нотных сочетаний, полученных в результате анализа, выбирается такая их совокупность, чтобы в каждом сочетании этой совокупности первые  $n - 1$  ноты совпадали с  $n - 1$  последними нотами уже построенно-

\*) Марковские процессы — это вероятностные процессы, рассматриваемые как последовательности случайных событий, которые обладают следующим свойством. Предположим, что в каждый момент времени некоторая система может находиться в одном из состояний  $w_1, w_2, \dots$  и с течением времени происходят случайные переходы из одного состояния в другое. Этот процесс называется *марковским*, если состояние  $w_i$  определяет лишь вероятность  $p_{ij}$  того, что через некоторое время  $t$  система перейдет в состояние  $w_j$ , причем эта вероятность не зависит от течения процесса в прошлом, т. е. до данного появления состояния  $w_i$ . Аппарат марковских процессов широко используется при точном анализе семиотических и эстетических явлений, в частности при изучении художественных текстов (о марковских процессах см., например, Б. В. Гнеденко, 1954; Дж. Кемени, Дж. Снелл, 1972).

\*\*) Понятие стационарной цепи Маркова рассмотрено, например, в статье Р. Л. Добрушина (1961) с иллюстрациями из русского письменного языка.

го отрезка мелодии-модели. Затем из этой совокупности выбирается случайным образом в соответствии со значением элемента матрицы перехода одно сочетание, и  $n$ -я его нота приписывается

Таблица 2.1

$i$	$j$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	$Q_i$
		G	A	H	c	d	e	f	g	a	h	
1	$hg$							1				1
2	$ah$								1			1
3	$aa$								2	2		4
4	$ag$							4				4
5	$af$						2					2
6	$ga$										1	1
7	$gf$						5		2			7
8	$ge$					1						1
9	$fa$									1		1
10	$fg$					1	3			1		5
11	$fe$	1	1	8	1		5					16
12	$fd$		1									1
13	$ea$						2	1		1		4
14	$ef$					1	9		2			12
15	$ee$				2	1	2					5
16	$ed$	1		11	1							13
17	$ec$	3				1						4
18	$eH$			2								2
19	$eA$	1										1
20	$df$		1							1		1
21	$de$	1	2			1	1					5
22	$dd$		1									1
23	$dc$	1	13									14
24	$dH$			1								1
25	$ce$				1		2	2			1	5
26	$cd$				1		4					5
27	$cc$	4	2									6
28	$cH$	17	6	3	1	1						28
29	$cA$	1	1									2
30	$cG$	1										1
31	$Hf$						1					1
32	$He$	1										1
33	$Hd$						3	1				4
34	$Hc$	1	1	5	2	4	1					14
35	$HA$	1	8	7			4	1		1		22
36	$Aa$											1
37	$Ae$							1		3		4
38	$Ac$		3	4	1	3						8
39	$AH$	5		6	1							12
40	$AA$			1	1							2

к готовому отрезку мелодии-модели. Таким образом, выбиралась  $n$ -я нота зависит лишь от  $n - 1$  предыдущих и не зависит от предшествующих им нот. Следующая нота строится так же. Полученная последовательность высот нот образует цепь Маркова порядка  $n$ . Отсюда следует, что порядок марковской цепи определяется

количеством связанных между собой последовательных элементов этой цепи, зависящих друг от друга. Затем эта последовательность высот накладывается на ритм, полученный независимо от звуко-высотной линии,— получается мелодия, которая, по мнению авторов метода, моделирует первоначальный нотный текст.

В указанных экспериментах по моделированию мелодий этим методом коэффициент связности мелодий  $n$  принимает значения, равные 1, 2, ..., 8 (в большинстве экспериментов  $n$  равно 3 или 4). Обзор этих работ дается в книге Р. Х. Зарипова (1971а); более поздние работы не внесли ничего нового в разработку метода.

Пример. Покажем, как производится марковский анализ, построение матрицы перехода и марковский синтез для случая  $n = 3$  на конкретном примере нотного текста, образованного из семи мелодий (см. ниже рис. 5.20), расположенных последовательно одна за другой.

Сначала составим переходную таблицу с двумя входами  $i$  и  $j$  (табл. 2.1). Слева выпишем все двухнотные сочетания, встречающиеся в заданном нотном тексте, а сверху — все разноименные высоты нот из текста. Для экономии места в таблице используем принятые в теории музыки буквенные названия нот:

$C$  — до,  $D$  — ре,  $E$  — ми,  $F$  — фа,  $G$  — соль,  $A$  — ля,  $H$  — си.

Ноты первой октавы обозначим прописными буквами, второй — строчными.

Элементы переходной таблицы — числа  $a_{ij}$ , показывающие, сколько раз в нотном тексте каждое двухнотное сочетание из  $i$ -й строки комбинируется в трехнотных сочетаниях с третьей нотой, указанной в  $j$ -м столбце. Сумму всех элементов  $i$ -й строки  $\sum_j a_{ij}$  обозначим через  $Q_i$ .

Перейдем к построению матрицы перехода. Элементы этой матрицы — переходные вероятности  $q_{ij}$ , которые получаются из элементов переходной таблицы  $a_{ij}$  следующим образом. Для каждой  $i$ -й строки значения  $q_{ij}$  вычисляются по формуле

$$q_{ij} = \frac{a_{ij}}{Q_i},$$

откуда

$$\sum_{j=1}^{10} q_{ij} = 1.$$

Для примера вычислим элементы  $q_{ij}$  одной строки. Пусть  $i = 28$ ; имеем

$$Q_{28} = \sum_{j=1}^{10} a_{28j} = 17 + 6 + 3 + 1 + 1 = 28;$$

$$q_{28;2} = 0,60, \quad q_{28;4} = 0,21, \quad q_{28;5} = 0,11,$$

$$q_{28;6} = 0,04, \quad q_{28;7} = 0,04.$$

Остальные элементы этой строки равны нулю.

Аналогично вычисляются элементы всех других строк матрицы перехода

$$Q = \|q_{ij}\|, \quad i = 1, 2, \dots, 40; \quad j = 1, 2, \dots, 10.$$

Элементам строки с номером  $i = 28$  в качестве одного из возможных вариантов соответствует распределение вероятностей, представленное графически на рис. 2.14. Это означает, что для каждого

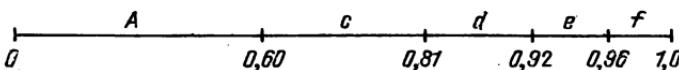


Рис. 2.14. Пример распределения вероятностей высоты звука.

случайного числа  $x$  ( $0 \leq x < 1$ ) матричная вероятность  $q_{ij}$  позволяет выбрать вполне определенную ноту.

В нашем примере выбирается нота

$$\begin{array}{ll} A (\text{ля}^1), & \text{если } 0 \leq x < 0,60, \\ c (\text{до}^2), & \text{если } 0,60 \leq x < 0,81, \\ d (\text{ре}^2), & \text{если } 0,81 \leq x < 0,92, \\ e (\text{ми}^2), & \text{если } 0,92 \leq x < 0,96, \\ f (\text{фа}^2), & \text{если } 0,96 \leq x < 1. \end{array}$$

(Индекс справа вверху у названия ноты обозначает номер ее октавы.) Так, если, например, случайное число  $x = 0,85$ , то выбирается нота  $re^2$ .

При марковском синтезе, таким образом, для каждой данной последовательности двух нот конструируется третья. Допустим, что мы получили каким-то образом некоторую последовательность, состоящую не менее чем из двух нот, и двумя последними ее нотами является последовательность  $p_1 = (\text{до}^2, \text{си}^1)$ . Для получения следующей ноты выбираем случайное число  $x$  (пусть будет  $x = 0,85$ ) и обращаемся к распределению вероятностей, образованному из строки с сочетанием  $p_1$  матрицы переходных вероятностей рассмотренным выше способом. В результате этого получаем третью ноту  $re^2$  и последовательность трех последних нот:  $\text{до}^2, \text{си}^1, re^2$ . Этот процесс далее применяется к следующим двум последним нотам полученной последовательности, а именно к  $p_2 = (\text{си}^1, pe^2)$ .

Таким образом, конструируется искомая последовательность нот. Аналогично, марковский анализ и синтез производятся для любого целого значения  $n = 1, 2, \dots$ , причем этим методом синтезированы в разных экспериментах только одноголосные композиции.

Нельзя не обратить внимание на следующее обстоятельство. Как видно из марковского анализа, ритм заданных мелодий совер-

шенно не отражается на структуре матрицы перехода, на основе которой производится марковский синтез, поскольку из этих мелодий берется лишь звуковысотная линия — последовательность высот нот.

Авторы этих экспериментов, а также ряд специалистов по кибернетике, которых привлекает простота и кажущаяся универсальность этого метода, заявляют, что он пригоден для успешного моделирования стиля любого композитора. Однако на самом деле такой способ моделирования не дает и не может дать хороших результатов, что ясно видно при сравнении музыкальных сочинений, взятых для марковского анализа, и машинных мелодий, полученных этим методом. По-видимому, в проведенных экспериментах совершенно отсутствовал этап оценки машинных результатов, иначе бы непригодность метода для моделирования музыкальных композиций была обнаружена без всякого труда.

Покажем, что этим методом не моделируются ни связи дальнего порядка, ни связи ближнего порядка в мелодии, в чем заключается причина неуспеха метода марковских цепей для моделирования музыкальных сочинений в известных экспериментах.

Прежде всего, мелодия традиционного типа не является цепью Маркова: в мелодии практически взаимосвязаны все ноты — они подчинены определенной логике развития, что и будет показано в гл. 3. Этот же метод предполагает лишь локальную взаимосвязь нескольких соседних звуков мелодии. Таким образом, связи дальнего порядка не учитываются.

Но может показаться, что метод учитывает связи ближнего порядка в мелодии, поскольку он основан на локальной взаимосвязи соседних звуков. Если бы это было так на самом деле, то можно было бы говорить о моделировании стиля музыки в смысле сходства напевов, интонаций, небольших отрывков мелодий, взятых для анализа и синтезированных. Однако и эти связи в экспериментах не учитываются: строение мелодии в них представлено слишком упрощенно, совершенно обособлены и независимы друг от друга различные стороны и элементы музыки, которые в действительности взаимосвязаны.

Как видно из способа выбора очередной ноты, процесс сочинения мелодии этим методом сводится к получению последовательности высот, совершенно не зависящей от ритма, который присыпается к ней уже после ее построения. И несмотря на то, что довольно длинные последовательности высот нот (до 15 и больше нот подряд в некоторых экспериментах) переносятся без изменения из первоначальных мелодий в синтезированные, при прослушивании особенно заметно отсутствие их сходства. Причина этого была выяснена выше, в гл. 1, при рассмотрении явления переноса, из которого следует, что при таком способе моделирования, когда высотно-метрические связи не сохраняются, полилинвариантная структура интонаций первоначальных мелодий разрушается.

Вследствие этого последовательность высот, являясь одним из инвариантов, не обеспечивает сходства мелодий, взятых для анализа, с синтезированными мелодиями при их слуховом восприятии. Это относится не только к целой мелодии, но и к фрагментам, ее интонациям, поскольку последовательность высот в  $n$ -нотных комбинациях, которая образуется при синтезировании мелодии методом марковского синтеза в рассмотренных экспериментах, не связана с ритмом.

Покажем теперь, как может быть использован метод марковских цепей для моделирования в музыке связей ближнего порядка. Для этого нужно так выбрать элемент марковской цепи, чтобы он отражал не только статистическую, но и музыкальную сторону мелодии. При этом, как следует из § 1.1, важно учесть соотношение метра и высот нот. Поэтому в качестве элемента марковской цепи рассматривается не отдельная сторона звука (высота, длительность или интервал между высотами), а более сложно организованная звуковая структура — своего рода мелодическая фонема, отражающая интервально-силовую сторону музыки.

Перенос сходства или подобия связей ближнего порядка, охватывающих несколько соседних элементов марковской цепи, производится на этапе марковского синтеза посредством матрицы перехода, сформированной на этапе марковского анализа, которая запоминает и отражает закономерности мелодий-оригиналов. Выбранный элемент, сохранив первоначальные интервально-силовые отношения, дает возможность варьировать значения истинных высот и длительностей в синтезированных мелодиях. Таким образом, имитируется микропроцесс творческого поиска композитора, когда при заданных интервально-силовых отношениях соседних звуков, необходимых для сохранения некоторого образа интонации, требуется найти действительные значения высот и длительностей мелодии, удовлетворяющие дополнительным требованиям, связанным с текстом песни, ее ритмикой и т. п. При этом из многих возможных вариантов решения, удовлетворяющего первоначальным интервально-силовым условиям, оптимальный вариант отбирается композитором по неосознаваемым критериям.

Введем понятие «вес звука в мелодии». Для простоты предположим, что наименьшей длительностью является восьмушка. Вес звука характеризуется положением начала звука на определенной доле такта и определяется относительной силой той восьмушки, с которой начинается данный звук. Номера под длительностями нот (рис. 2.15) показывают относительную силу восьмушек в такте для четырех- и трехдольного метров с тактовыми размерами соответственно  $4/4$  и  $3/4$ . Меньший номер соответствует большей силе восьмушки в такте.

Задав первоначальное значение веса для крупных долей такта, можно определить вес более мелких длительностей,— при последовательном их дроблении на две равные части.

Для марковского анализа нотного текста последовательно определяются следующие параметры:

Порядковый номер  $k$  текущей ноты в нотном тексте.

$k$ -й элементарный мотив, связывающий  $k$ -ю и  $(k+1)$ -ю ноты текста.

Относительная сила  $p_k$   $k$ -й ноты.

Значение стопы  $S_k$  для  $k$ -го элементарного мотива, где  $S_k = \text{sign}(p_{k+1} - p_k)$ . Поскольку здесь рассматриваются две соседние



Рис. 2.15. Относительный вес восьмых в такте.

ноты —  $k$ -я и  $(k+1)$ -я, то образующиеся при этом стопы двусложны и соответствуют хорею (с ударением на первом слоге) или ямбу (с ударением на втором слоге). При  $S_k = +1$  стопа называется хореической (от сильной  $k$ -й ноты с  $p_k$  к более слабой  $(k+1)$ -й ноте с  $p_{k+1}$ ), при  $S_k = -1$  — ямбической (от слабой  $k$ -й ноты с  $p_k$  к более сильной  $(k+1)$ -й ноте с  $p_{k+1}$ ).



Рис. 2.16.  $SI$ -элементы марковской цепи в мелодии:  $k$  — номер ноты;  $p$  — относительный вес ноты в такте; знак плюс означает хореическую стопу, знак минус — ямбическую.

Значение интервала  $I_k$  между высотами  $W_k$  и  $W_{k+1}$  нот, определяемого количеством ступеней между ними,  $k$ -го элементарного мотива:  $I_k = W_{k+1} \ominus W_k$ , где  $\ominus$  — символ специальной операции вычитания (см. § 5.1).

Таким образом, каждый элемент  $S_k I_k$  ( $k = 1, 2, \dots$ ) марковской цепи элементарных мотивов определяется по формуле

$$S_k I_k = (\text{sign}(p_{k+1} - p_k); W_{k+1} \ominus W_k). \quad (2.1)$$

Пример. Определим элементы  $S_k I_k$  в мелодии песни А. Дулова «Хромой король» (рис. 2.16). На рисунке показаны номера нот  $k$ ; горизонтальными прямыми скобками отмечены элементарные мотивы, связывающие две соседние ноты с номерами  $k$  и  $k+1$ ; под каждой нотой подписано значение относительной силы  $p_k$ ; между соседними значениями  $p_k$  и  $p_{k+1}$  помещен знак стопы  $S_k$ .

Запишем значения элементов  $S_k I_k$ , определенных по формуле (2.1), для каждого  $k$ -го элементарного мотива мелодии:

$k =$	1	2	3	4	5
$SI =$	(-1, 0)	(+1, +1)	(+1, -1)	(-1, +3)	(+1, -5)
	6	7	8	9	
	(+1, 0)	(-1, +2)	(+1, -1)	(+1, -1)	
	10	11	12	13	
	(-1, +1)	(+1, +1)	(-1, 0)	(+1, +1)	
	14	15	16	17	
	(+1, -1)	(-1, +4)	(+1, -2)	(+1, -1)	
	18	19	20	21	
	(-1, -1)	(+1, -1)	(+1, +1)	(-1, -2)	

При составлении матрицы перехода для марковской цепи  $n$ -го порядка прежде всего определяются значения  $S$ ,  $I$  всех элементов марковской цепи. После этого в соответствии с матрицей перехода производится марковский синтез для заданного ритма мелодии, в котором предварительно определяются (вычисляются) значения стоп.

Для случая, когда элементом марковской цепи является стопа-интервал  $SI$ , схема марковского анализа в общих чертах совпадает с вышеописанной схемой, когда элементом цепи (нотой) была высота  $W$ . Составление же матрицы перехода и марковский синтез мелодий-моделей  $M_b$  существенно отличаются от нее. Отличие заключается прежде всего в том, что к готовому отрезку мелодий-модели с высотой последней ноты  $W_{k+n-1}$  приписывается не высота ноты, а найденный интервал  $I_{k+n-1}$ , по которому и определяется высота  $W_{k+n}$  следующей ноты. Кроме того, известен ритм  $R_b$  синтезируемой мелодии  $M_b$ , по которому определяется последовательность стоп  $S_k$ ,  $k = 1, 2, \dots$ , в которых отражены силовые отношения длительностей этого ритма. Ритм  $R_0$  мелодий, взятых для анализа, отражен в структуре матрицы перехода значениями стоп  $S$ . Это влияет при синтезировании мелодий на выбор интервалов  $I$ , которые связаны со значениями стоп  $S$ , поскольку ритм  $R_b$  задается до отыскания искомой последовательности высот.

С учетом этих отличий опишем способ составления матрицы перехода для марковской цепи  $n$ -го порядка ( $n = 1, 2, \dots$ ). Сначала по формуле (2.1) отыскивается последовательность

$$S_1 I_1, S_2 I_2, \dots, S_k I_k, \dots, \quad (2.2)$$

где  $S_k = +1, -1$ ;  $I_k = \dots, -1, 0, +1, \dots$ ,  $k = 1, 2, \dots$ , и составляется переходная таблица с двумя входами:  $i$  и  $j$  (табл. 2.2).

В столбце II выписаны все встречающиеся в последовательности (2.2) различные сочетания вида

$$S^1 I^1 S^2 I^2 \dots S^{n-1} I^{n-1} S^n, \quad (2.3)$$

в столбце III — все различные интервалы  $I^n$ , встречающиеся в заданном нотном тексте  $M_0$ . Для удобства практических вычислений на этапе синтеза в  $j$ -м столбце помещается не весь элемент  $S^n I^n$ , а лишь искомый интервал  $I^n$ , поскольку значение  $S^n$  известно из заданного ритма  $R_b$ . Это значение, добавленное к последовательности  $S^1 I^1 S^2 I^2 \dots S^{n-1} I^{n-1}$  последних  $n - 1$  элементов синтезированной части мелодии  $M_b$ , и образует сочетание (2.3).

Таблица 2.2

I	II	III	IV
№	$S^1 I^1 \dots S^{n-1} I^{n-1} S^n$	$(I^n)_1 (I^n)_2 \dots (I^n)_j \dots$	$Q_i$
1	$(S^1 I^1 \dots S^{n-1} I^{n-1} S^n)_1$	$a_{11} \ a_{12} \ \dots \ a_{1j} \ \dots$	$\sum_j a_{1j}$
...	...	...	...
$i$	$(S^1 I^1 \dots S^{n-1} I^{n-1} S^n)_i$	$a_{i1} \ a_{i2} \ \dots \ a_{ij} \ \dots$	$\sum_j a_{ij}$
...	...	...	...

Элементами таблицы перехода служат числа  $a_{ij}$ , показывающие, сколько раз в  $n$ -элементных комбинациях  $S^1 I^1 S^2 I^2 \dots S^n I^n$  последовательности (2.2) каждое сочетание  $(S^1 I^1 S^2 I^2 \dots S^n)_i$ , записанное в  $i$ -й строке, комбинируется с  $j$ -м интервалом  $(I^n)_j$  в столбце III. В столбце IV  $Q_i$  обозначает сумму всех чисел  $a_{ij}$   $i$ -й строки. Далее строится матрица перехода, элементами которой являются переходные вероятности  $q_{ij}$ , вычисляемые по формуле

$$q_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_j a_{ij}},$$

откуда для каждой  $i$ -й строки следует  $\sum_j q_{ij} = 1$ .

При марковском синтезе производится конструирование звуковысотной линии мелодии  $M_b$  для заданного ритма  $R_b$  на основе матрицы перехода, составленной в результате анализа исходного нотного текста. Звуковысотная линия искомой мелодии  $M_b$  получается последовательно — нота за нотой. Выбор очередной высоты производится следующим образом. Для каждой данной последовательности последних  $n$  стоп  $S_k, S_{k+1}, \dots, S_{k+n-1}$  и  $n$  высот  $W_k, W_{k+1}, \dots, W_{k+n-1}$  выбирается интервал  $I$ , по которому и определяется  $(n+1)$ -я высота  $W_{k+n}$ . Допустим, что каким-то образом получена последовательность, состоящая не менее чем из  $n$  нот

(длительностей и высот) и еще одной длительности, по которым определяется сочетание

$$S_l I_l S_{l+1} I_{l+1} \dots S_{l-n-2} I_{l+n-2} S_{l+n-1}.$$

Допустим, что такое сочетание находится в  $i$ -й строке матрицы перехода. Для получения следующего интервала  $I_{l+n-1}$  выбираем случайное число  $x$  и обращаемся к распределению вероятностей, образованному рассмотренным выше способом из ненулевых элементов  $q_{ii}, q_{i2}, \dots, q_{ij}, \dots i$ -й строки матрицы перехода, в которой находится это сочетание. В результате определяем искомый интервал  $I_{l+n-1}$  и, следовательно, высоту  $W_{l+n}$  по формуле

$$W_{l+n} = W_{l+n-1} \oplus I_{l+n-1},$$

где  $W_{l+n-1}$  — высота предыдущей,  $(l+n-1)$ -й ноты, а  $\oplus$  — символ специального сложения, определяемого ниже в § 5.1. Если в ритме  $R_b$  имеется еще одна длительность, то этот процесс продолжается для получения соответствующей ей высоты.

Таким образом, нахождение высоты зависит от интоационных свойств (интервально-силовых отношений) исходного нотного текста  $M_0$  и сформированного отрывка, а именно  $n$  последних нот искомой мелодии  $M_b$ .

Задание ритма  $R_b$  накладывает определенные ограничения на выбор искомых параметров мелодии. Теоретически даже можно представить себе случай, когда такой синтез невозможен. Дело в том, что при марковском синтезе  $n$ -го порядка для каждого сочетания  $n$  стол  $S_l S_{l+1} \dots S_{l+n-1}$  ритма  $R_b$  точно такое же сочетание должно найтись и в ритме  $R_0$  исходного нотного текста и вследствие этого оно должно быть расположено в одной из строк матрицы переходных вероятностей. Если же такого сочетания в ритме  $R_0$  нет, то ритм  $R_b$  не годится для синтезирования мелодии по данной матрице перехода.

Приведем простой пример, подтверждающий теоретическую возможность этого случая. Пусть ритм  $R_0$  таков, что последовательность стоп, порожденная им, представляет собой чередование значений +1 и -1, вида +1, -1, +1, -1, +1, -1, ... Это имеет место, например, в случае, если ритм с музыкальным размером 4/4 образован лишь половинными длительностями. Представим себе, что в ритме  $R_b$  имеется сочетание стоп +1, +1 (на-

пример, для ритмической фигуры  , которого нет в исходном ритме  $R_0$ . В этом случае для любого значения  $n$  (при  $n \geq 2$ ) синтез мелодии невозможен.

Практически же при достаточно большом объеме исходных мелодий и небольшом значении  $n$ , не превышающем трех-четырех (при этом значении  $n$  взаимосвязаны четыре-пять соседних нот), такой случай представляется маловероятным.

Однако, учитывая такую возможность, прежде всего надо проверить, годится ли ритм  $R_b$  для данной матрицы переходных вероятностей, т. е. для марковского синтеза данного порядка  $n$ .

Может также оказаться, что полученного при синтезировании мелодии  $M_b$  сочетания

$$S_l I_l S_{l+1} I_{l+1} \dots S_{l+n-2} I_{l+n-2} S_{l+n-1} \quad (2.4)$$

нет среди строк матрицы перехода, хотя сочетание стоп

$$S_l S_{l+1} \dots S_{l+n-2} S_{l+n-1}$$

в ритме  $R_0$  и, следовательно, в матрице перехода имеется. В этом случае сочетание (2.4) не подходит из-за непригодности в нем интервала  $I_{l+n-2}$ , который следует заменить. Для этого надо вернуться на один шаг процесса марковского синтеза и повторить выбор нового значения интервала  $I'_{l+n-2}$  уже по предшествующему в синтезированной части мелодии  $M_b$  сочетанию

$$S_{l-1} I_{l-1} S_l I_l \dots S_{l+n-3} I_{l+n-3} S_{l+n-2},$$

исключая при этом выбор непригодного значения интервала  $I_{l+n-2}$ . Новый вариант (2.4) — сочетание

$$S_l I_l S_{l+1} I_{l+1} \dots S_{l+n-2} I'_{l+n-2} S_{l+n-1} \quad (I'_{l+n-2} \neq I_{l+n-2})$$

— отыскивается в матрице перехода, и если оно там найдется, то в соответствии с распределением вероятностей выбирается следующий интервал  $I_{l+n-1}$ . В противном случае процесс повторяется.

При малом объеме первоначального нотного текста  $M_0$  некоторая  $i$ -я строка матрицы перехода может содержать малое число ненулевых переходных вероятностей  $q_{ij}$ , что приводит к ограниченному числу вариантов выбора интервала  $I_{l+n-1}$  по находящемуся в этой строке сочетанию, а в вырожденном случае, когда в строке имеется лишь одна вероятность  $q_{ij} = 1$ , — к однозначному выбору одного-единственного значения интервала.

Достаточно большой объем ритмически разнообразного нотного текста, взятого для марковского анализа, практически исключает рассмотренный случай даже при относительно большом значении порядка марковской цепи.

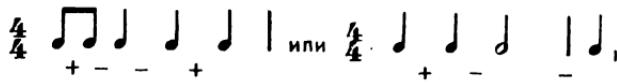
Пример. Рассмотрим способ моделирования мелодий методом марковских цепей с элементом  $SI$  на простом примере с малым объемом исходного нотного текста для марковского анализа и значением  $n = 2$ .

Матрица переходных вероятностей (табл. 2.3) составлена на основе марковского анализа мелодии песни А. Дурова «Хромой король», приведенной на рис. 2.16, для которой выше выписана последовательность элементов  $SI$ . В этой таблице для краткости значение стопы, равное +1 или -1, задается лишь его знаком, + или -.

Таблица 2.3

i	$S^1$	$I^1$	$S^2$	$j=1$	2	3	4	5	$I^2$	6	7	8	$Q_i$
				-5	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4		
1	+	+1	+				1						2
2	+	+1	-		1/2		1/2						2
3	+	0	-							1			1
4	+	-1	+			1/2			1/2				2
5	+	-1	-			1/4			1/4				4
6	+	-2	+			1					1/4	1/4	1
7	+	-5	+				1						1
8	-	+4	+		1								1
9	-	+3	+	1									1
10	-	+2	+			1							1
11	-	+1	+					1					1
12	-	0	+						1				2
13	-	-1	+				1						1

Прежде всего заметим, что ни в одной строке матрицы перехода нет сочетания стоп  $S_i S_{i+1}$ , равного значению ——. Поэтому, если бы ритм  $R_b$  искомой мелодии содержал, например, последовательность нот



то ее синтез по данной матрице перехода был бы невозможен. По этой причине в качестве  $R_b$  непригоден ритм мелодии «ИИ-канта» (см. рис. 2.2), поскольку в первых двух тактах как припева, так и запева ее встречается такое сочетание стоп. Заметим в связи с этим, что если в ритме искомой мелодии  $R_b$  встретится сочетание стоп +++, связывающее четыре соседние ноты, например, в ритмической фигуре для музыкального размера 3/4



то марковский синтез при  $n = 3$  невозможен, поскольку в последовательности стоп исходной мелодии такого сочетания нет; при  $n = 2$  он реализуется посредством двукратного использования сочетания стоп ++.

Как видно из табл. 2.3, выбор интервалов в подавляющем числе случаев происходит однозначно, так как значения переходных вероятностей  $q_{ij}$  для 10 строк из 13 равны 1.

Для иллюстрации на рис. 2.17 записаны две мелодии с разными тактовыми размерами —  $2/4$  и  $3/4$ , полученные в результате марковского синтеза в соответствии с матрицей перехода табл. 2.3. Ритм  $R_b$  для первой из них взят из мелодии «Песни о встречном» Д. Шостаковича, приведенной на рис. 1.1, а для второй — из мелодии «По Дону гуляет...» (см. ниже рис. 3.15). При сравнении этих синтезированных мелодий с исходной (см. рис. 2.16), взятой для анализа и составления матрицы перехода, видно совпадение некоторых интонаций.

Из описания метода моделирования мелодий посредством марковских цепей элементов  $SI$  и приведенного примера видно, что



Рис. 2.17. Примеры мелодий, синтезированных методом марковских цепей элементов  $SI$ , отражающих интервально-силовые отношения в мелодии А. Дулова «Хромой король» (см. рис. 2.16).

в синтезированных мелодиях  $M_b$  сохраняются отношения интервалов  $I$  и стоп  $S$  (но не значения длительностей), что при варьировании конкретных длительностей обеспечивает впечатление сходства с первоначальными интонациями.

Заметим еще раз, что при моделировании мелодий этот метод пригоден не для синтезирования всей мелодии целиком, а лишь для получения отдельных интонаций, которые могут быть включены в структуру мелодии, учитывающую повторность различных ее мелодических и ритмических фигур, а также расчлененность ее на отдельные построения — однотактовые мотивы, двухтактовые фразы и четырехтактовые предложения. Такая структура рассматривается далее (в гл. 3) при анализе закономерностей и принципов строения музыкальных сочинений.

## ГЛАВА 3

# АНАЛИЗ МЕЛОДИЙ И ИХ ВАРИАЦИЙ

---

### § 3.1. Музыка как объект исследования

*Мелодия — главный элемент музыкального сочинения. Основные стороны мелодии.*

Музыка обладает весьма важной особенностью, которая с точки зрения возможности моделирования выгодно отличает ее от других видов искусства. Музыкальное произведение, как и произведение других видов искусства, воплощает идеи, мысли, настроения и отражает действительность отвлеченно от точного изображения ее наглядных, конкретных внешних признаков, представляя собой вполне определенную специфическую структуру. Музыка в определенном смысле относится к выразительным, а не к изобразительным видам искусства. Музыкальное искусство — это не только способ выражения и возбуждения человеческих эмоций и настроения, но и своеобразный метод мышления со своей структурой, грамматикой и логикой.

Основной, главный элемент многих музыкальных произведений — *мелодия*, одноголосное выражение музыкальной мысли. Именно при сочинении или восприятии мелодии наиболее наглядно и полно проявляется в музыке работа механизма интуиции подражания, узнавания или распознавания определенного типа композиций. При этом получение результата не требует знания структуры (синтаксиса) сочинения и основано в значительной мере на интуиции (в частности, при сочинении — на интуитивном подражании). Это относится и к узнаванию темы в музыкальной вариации. Так, при прослушивании вариаций мы, вообще говоря, довольно свободно выделяем из них тему и ощущаем как сходство, так и различия между темой и вариациями. Восприятие осуществляется сразу на разных уровнях: крупным планом (выделение и узнавание темы в вариации) и в деталях (фактура вариации, отклонения от темы, украшения и т. п.). Такого наглядного проявления интуиции нет в других видах музыкальных сочинений более сложной структуры, например в многоголосных (гармонизация или контрапункт), где во многом требуется формально-рационалистический подход при сочинении или анализе композиций.

Как известно, при сочинении мелодии композитор не разделяет этот сложный психологический процесс на отдельные операции. Мелодия часто появляется в его сознании сразу как некая завер-

шенная форма. Здесь проявляется действие интуиции подражания, основанной на предшествующем опыте слушания музыки. Композитор не всегда осознает, что при сочинении музыки он использует различные закономерности и правила композиции, те или другие композиционные средства — в зависимости от формы создаваемого музыкального произведения. При этом используются как общие закономерности, присущие тем или другим типам музыкальных сочинений, так и специфические, характеризующие стилевые особенности композитора, его творческий почерк. Наличие этих закономерностей обнаруживается обычно при анализе музыкальных сочинений.

Ниже приводится анализ простых по форме одноголосных музыкальных сочинений — мелодий, чтобы дать представление о принципах и закономерностях их строения. В дальнейшем изложении будут часто использоваться различные музыкальные понятия. Поэтому, по-видимому, целесообразнее здесь не только привести сведения о них или отослать читателя к специальной музикоедческой литературе (см., например, Б. С. Штейнпресс, И. М. Ямпольский, 1966), но и показать, как могут быть обнаружены при рассмотрении музыкального сочинения те или другие его стороны, закономерности строения и развития, средства композиции.

При алгоритмизации музыкальных сочинений необходимо не только обнаружить закономерности строения или развития музыкального сочинения, но и достаточно строго сформулировать их, найти взаимозависимости между различными элементами композиции — логические, смысловые и ассоциативные связи между ними. Поэтому анализ композиции должен быть машиноориентированным и учитывать дальнейшее программирование выявленных при анализе закономерностей.

Принятый в музикоедческой литературе анализ музыкальных сочинений, по-видимому, вполне удовлетворительный для нужд музикоедов, недостаточен по строгости изложения и по точности определений (степени раскрытия содержания) музыкальных понятий. Поэтому описание закономерностей иногда будет доводиться до строгих однозначных формулировок. На хорошо известных примерах мелодий массовых песен здесь будет проиллюстрирован подход к выявлению и, вслед за этим, к формализации некоторых правил композиции.

Для анализа мелодии и выявления закономерностей ее строения целесообразно использовать ее нотную запись. Музыкальное произведение (как и литературное произведение) развивается во времени и воспринимается постепенно — разложенным во времени. Это — одно из существенных отличий музыки от других видов искусства — живописи, скульптуры, архитектуры, которые существуют одномоментно, в целом. Поэтому анализировать мелодию в нотной записи удобнее, чем анализировать звучашую мелодию,

звуки которой непрерывно меняются во времени, и вся сыгранная или спетая мелодия куда-то уплывает, исчезает. И чем сложнее структура мелодии, чем разнообразнее музыкальные средства, тем труднее ее запомнить, не говоря уже об анализе ее — выделении и сопоставлении различных элементов, выявлении закономерностей строения и развития, ее структуры и т. п.

При рассмотрении же нотного текста перед глазами всегда находится застывший рисунок мелодии, что дает возможность разглядывать его со всех сторон, интересующих исследователя. Этому способствует распространенный теперь способ кодирования (нотной записи) звучащей музыки, отражающий ее разные свойства, такие, например, как развитие ее во времени (запись слева направо, вдоль координатной оси времени), изменение высоты (частоты) звука (чем выше звук, тем выше на нотоносце помещается нота, обозначающая этот звук), изменение силы того или другого звука и т. п.

При анализе обращается внимание лишь на те стороны мелодии, которые характерны именно для ее сочинения, а не для исполнения. Так, мелодию «Сентиментального вальса» П. Чайковского мы узнаем независимо от того, будет исполнена она высоким голосом сопрано или низким басом, на скрипке или кларнете, громко или еле слышно, плавным легато или отрывистым стаккато.

Варьирование мелодии (при воспроизведении, а следовательно, и при ее восприятии) наблюдается уже при исполнении одной и той же мелодии разными тембрами (разными музыкальными инструментами), или в разных темпах, или при разных динамических указаниях. Однако мы не будем рассматривать тембровые, темповые и динамические способы варьирования, поскольку они реализуют одну и ту же нотную запись композиции, включающей указания о высоте, длительности и силе звуков, составляющих композицию. Иначе говоря, мы будем рассматривать нотную запись композиции отвлеченно от тембра, темпа и динамики исполнения. Поэтому различные акустические, тембровые, динамические, а также исполнительские стороны далее не учитываются.

Здесь будут рассмотрены закономерности четырех основных сторон мелодии — масштабной, ритмической, звуковысотной и ладогармонической. Цель нашего анализа — показать в мелодиях лишь те закономерности, которые встречаются в дальнейшем изложении теории моделирования мелодических вариаций. Более полный анализ мелодии приводится в книге автора (Р. Х. Зарипов, 1971а).

В качестве примера для анализа лучше взять мелодию известной массовой песни, схематизированную, которая позволила бы достаточно легко продемонстрировать возможно большее количество правил и закономерностей композиции. Классический образец

такой песни — знаменитый «Чижик-пыхик». Кто не знает с детства мелодии и слов этой песни? Вряд ли можно найти у нас другую песню, которая бы в течение многих поколений была более популярной, более известной, чем «Чижик». Это, в частности, дало повод Н. А. Римскому-Корсакову назвать ее «всемирно известным Чижиком» (Н. А. Римский-Корсаков, 1902).

Редко встретишь чёловека, даже весьма далекого от музыки, который хотя бы раз в жизни не проиграл эту мелодию — одним пальцем — на клавиатуре рояля или аккордеона. А такие дополнительные ассоциации, возникающие при проигрывании мелодии на рояле, помогают наглядно представить себе соответствие нотной записи мелодии ее воплощению в звуке и, таким образом, объединить зрительное и слуховое восприятие мелодии.

Мотив этот благодаря своей примитивной простоте крайне легко запоминается. Даже откровенно немузыкальный царь Додон из оперы «Золотой петушок» Римского-Корсакова, который, по собственному признанию, «сроду не певал», но был поставлен в необходимость запеть на старости лет,— и тот оказался в состоянии припомнить мелодию «Чижика» и, используя ее для своего несколько своеобразного лирического обращения к Шемаханской царице («Буду век тебя любить, постараюсь не забыть. А как стану забывать, ты напомнишь мне опять.»), переварил слегка только вторую фразу в предложении.

Мы настолько привыкли к «Чижику», что давно уже считаем его нашей стариинной русской народной детской песенкой. Однако вот что узнаем мы, читая историческое исследование о «Чижике» в «Русской музыкальной газете» (см. С. С., 1916). Приведем (с небольшим сокращением) отрывок из этой статьи:

«Почти никому, однако, не известно, что этот Чижик, по всем видимостям природный россиянин — на самом деле явился из Империи Восходящего Солнца. Японская детская песня, известная уже в глубокой древности, начинается следующими словами:

«Маленькая пташка, маленькая пташка!

где ты была?

«— Я была на речке (sic!), я пила саки»  
(рисовая водка).

Мелодия совершенно тождественна — это тема «Чижика» в ее чистом виде, то есть без тех немногих украшений, которые иногда прибавляются в пении, например, в последней фразе, которая в первоначальном виде сводится к простой кварте с четвертой ноты на пятую.

Важнее — особенность второй строки («где ты был?»), где имеется уменьшенная терция вместо последовательности секунд, как в русской передаче; эта простейшая форма более согласна с ограничениями монгольской гаммы.

Как бы то ни было, «Чижик» — японский гость. И прежде чем пить «водку на Фонтанке» (...), — за несколько веков до этого,

чижик в виде пестрой фантастической птицы японских сказок угощался саки на своей далекой родине».

Исключительно простая, примитивная мелодия «Чижика» вместе с тем служит удачным примером законченного, завершенного по форме музыкального сочинения. Эту мелодию мы рассмотрим с четырех основных сторон, перечисленных выше. Те же правила композиции, которые для «Чижика» нехарактерны, будут рассмотрены на примерах других массовых песен. Надо сказать, что бытует несколько вариантов мелодии «Чижика». Один из них и будет приведен в следующем параграфе.

### § 3.2. Строение мелодии

*Ритм. Звуковысотная линия. Расчленение мелодии — масштабно-тематическая структура. Затакт. Роль повторности в мелодии. Лад.*

Итак, перед нами мелодия «Чижика» (рис. 3.1) в нотной записи. Сначала обратим внимание лишь на последовательность длительностей нот, на ритмическую сторону мелодии (рис. 3.2). Мелодия состоит из звуков, различных по долготе звучания, по длительности. Одни звуки — короче, другие — продолжительнее. Так, «половинная» нота, обозначаемая  $\text{♩}$ , звучит в два раза дольше, чем «четвертная»  $\text{♪}$ . А эта в свою очередь в два раза продолжительнее «восьмушки»  $\text{♪}$ , которая встречается в других мелодиях. Продолжительность же звучания сочетания



(две

восьмушки) равна длительности одной четвертной ноты. Все звуки мелодии разделяются на группы, расположенные одна за другой, в каждой из которых один звучит сильнее, с большим ударе-



Рис. 3.1. Мелодия «Чижика».



Рис. 3.2. Ритм «Чижика».

нием, а все другие — слабее. Каждая такая группа нот называется *тактом*, и в нотной строке один такт от другого отделяется вертикальной *тактовой чертой*, стоящей перед ударной нотой, или сильной долей такта. Нетрудно заметить, что сумма всех длительностей в каждом такте «Чижика» точно равна длительности двух четвертей, т. е. длительности половинной ноты. Это обсто-

ятельство, выражающее продолжительность звучания каждого такта, и отмечается дробью (или тактовым размером) 2/4, которая ставится в начале нотной строки после знака музыкального ключа. Знаменатель этой дроби показывает, на сколько частей делится целая нота, а числитель — сколько таких долей содержится в такте.

В размере 2/4 или 4/4 сочиняются марши и такие танцы, как блюз, фокстрот, чарльстон, танго. Для других ритмов, например вальса, мазурки, характерен размер 3/4. Трехдольный размер 3/4



Рис. 3.3. Вальс и марш А. Лепина из кинофильма «Здравствуй, Москва!» с одной и той же мелодической линией и разными метроритмами.

отличается от четырехдольного размера 4/4 меньшей угловатостью, большей плавностью, закругленностью, легкостью. Особенно это заметно при сопоставлении двух мелодий с одной и той же мелодической линией при одних и тех же ритмических акцентах, но с разными тактовыми размерами. Пример такой пары мелодий — марш и вальс А. Лепина из кинофильма «Здравствуй, Москва!» (рис. 3.3).

Существует много других тактовых размеров (например, 5/4, 6/8, 5/8), которые здесь не будут рассматриваться. По существу, они сводятся в определенном смысле к этим двум (3/4 и 2/4).

Тактовый размер вводится для обозначения *метра* — упорядочения ритмических соотношений, выражающего порядок чередования ударных и неударных долей в такте. В четырехдольном ритме сильные доли такта следуют друг за другом через каждые четыре четверти и четыре доли каждого такта имеют разную силу звука. В порядке убывания силы звука эти доли (в схеме) располагаются так: первая, третья, вторая, четвертая. Самая сильная — первая доля, самая слабая — четвертая. В трехдольном ритме эти доли соответственно расположены следующим образом: первая, вторая, третья.

Ритм играет большую роль в формировании, строении и развитии мелодии. От него зависит смысловая акцентировка того или другого звука мелодии, он обладает разнообразными выразительными возможностями. «Ритм сам по себе — музыка», — говорил

А. Рубинштейн. Поэтому многие общие жанровые свойства музыки заключены именно в ритме. Различная организация одних и тех же длительностей приводит к различным по характеру ритмам. Например, ритм марша отличается от своеобразного ритма вальса, мазурки и т. п. И часто мы узнаем мелодию лишь по одному ее характерному ритму.

При всей важности ритма специфическую сторону мелодии составляют интервально-высотные соотношения, мелодический рисунок, или звуковысотная линия.

Обратимся к рис. 3.4, поясняющему сказанное. Здесь бросается в глаза взаимное расположение нот по высоте — мелодический рисунок, мелодическая волна с ее подъемами, кульминациями и спадами. Одни ноты как бы идут вверх, другие вниз — наблюдается смена направления движения. Различно и число нот,



Рис. 3.4. Звуковысотная (мелодическая) линия «Чижика».

идущих в одном движении, вверх или вниз, причем, казалось бы, трудно подметить какую-то закономерность в количестве нот в одном движении — словно оно каждый раз, в разных местах мелодии выбрано совершенно случайно. Однако при внимательном исследовании обнаруживаются определенные закономерности движения и развития мелодической линии. В большинстве песенных мелодий, как правило, число нот, идущих в одном движении, не превышает шести, хотя встречаются иногда и исключения. В этом можно убедиться, просматривая другие мелодии.

Теперь обратим внимание на интервалы по высоте (по вертикали) между соседними нотами. Они различны по величине и по направлению. Так, 2-я и 1-я, 3-я и 2-я, 4-я и 3-я ноты смешены одна относительно другой на две ступени. Будем говорить, что в этом случае интервал равен двум. А 9-я нота остается на прежнем месте — интервал между 9-й и 8-й нотами равен нулю.

Интервал определим как количество ф ступеней между высотами нот. Разные интервалы имеют определенные названия:

$\phi = 0$  — *прима*, 1 — *секунда*, 2 — *терция*, 3 — *кварта*, 4 — *квинта*, 5 — *секста*, 6 — *септима*, 7 — *октава*, 8 — *нона* и т. д.

После широкого интервала — скачка мелодии *ре* — *соль* на словах «был? На» следует несколько узких, малых интервалов величиной в секунду — так называемое поступенное движение, заполняющее предыдущий скачок. С таким же явлением мы встречаемся в начале песни А. Варламова «Красный сарафан» (рис. 3.5).

Это поступенное заполнение скачка закономерно и довольно часто встречается в различных мелодиях, придавая им напевность

и плавность. Поступенное движение — разновидность заполнения скачка. Более общим является случай вращения в диапазоне скачка, когда скачок заполняется нотами, отделенными друг от друга малыми интервалами, например, такими, как прима, секунда или терция. При этом одни ноты идут вниз, а другие — вверх, чем и обеспечивается вращение. На рис. 3.6 показано заполнение скачка секундовыми ходами.

Как правило, сумма двух соседних интервалов при движении мелодии в одном направлении (вверх или вниз) не превышает интервала октавы, т. е. семи ступеней. В других, больших по размеру мелодиях можно заметить следующее любопытное явление.

**A. Варламов. «Красный сарафан»**



Рис. 3.5. С скачком с поступенным заполнением.

При широких интервалах мелодии в одном движении идет малое количество нот. Если же в одном движении идет больше нот, то интервалы между ними меньше, уже.

Напевая «Чижика», мы ясно чувствуем расчленение, разделение всей мелодии на два построения, на две части, или, как говорят, на два предложения. Такое расчленение на отдельные

**B. Соловьев-Седой. «Соловьи»**



Рис. 3.6. Вращение мелодической линии в диапазоне скачка.

построения (предложения, более мелкие — фразы и мотивы) обнаруживается в любом музыкальном произведении, в любой мелодии, являясь закономерностью структуры. Можно выделить несколько типов структуры мелодии, которые ее характеризуют с разных сторон, — масштабной, ритмической, звуковысотной (мелодической) и т. п.

*Масштабная структура* отражает расчлененность мелодии на отдельные построения и количество тактов в каждом построении. Так, например, в массовых песнях длина мелодии, как правило, составляет восемь (или шестнадцать) тактов, часто разделяясь на два четырехтактовых *предложения*, которые в свою очередь тоже могут делиться на двухтактовые *фразы* и однотактовые *построения — мотивы*. Мелодия «Чижика», например, делится на

два предложения по четыре такта в каждом, и его масштабная структура имеет вид  $1+1+2+4$ .

Масштабная структура песни И. Дунаевского «Молодежная» имеет вид  $2+2+1+1+2$ . В нотной записи этих песен на рис. 3.1 и 3.7 фигурными скобками отмечены все построения, на которые расчленяется мелодия.

*Ритмическая и мелодическая структуры определяют повторность ритмических и мелодических фигур. Из рис. 3.2 видно, что ритм первого четырехтактового предложения совпадает с ритмом второго предложения. В то же время каждое предложение состоит из двух разных двутактовых ритмических фигур. Такую*

И. Дунаевский. «Молодежная»



Рис. 3.7. Расчленение мелодии на отдельные построения (предложения, фразы, мотивы) в соответствии с масштабной структурой  $2+2+1+1+2$ .

организацию ритма мелодии можно выразить следующей структурой: 1 2 1 2. Она показывает, что номера 1 и 2 обозначают разные двутактовые ритмические фигуры, расположенные в определенном порядке.

Аналогично можно определить и мелодическую (или звуковысотную) структуру каждой мелодии.

«Чижик-прыжик» — короткая мелодия, хотя это вполне законченное музыкальное сочинение. Мелодии, приведенные для примера на наших рисунках, имеют форму музыкального периода. *Период* — это построение, в котором изложена более или менее законченная музыкальная мысль. В форме периода часто строятся небольшие пьесы — некоторые романсы, мелодии одного куплета песни и т. п. Обычно период состоит из двух частей (предложений), каждая из которых содержит чаще всего четыре такта. Предложение расчленяется на две фразы, каждая из которых может делиться на однотактовые мотивы (см. рис. 3.7). Эта форма музыкального периода получила большое распространение, особенно в массовых песнях и танцах. Другие музыкальные пьесы имеют более сложное строение.

В «Чижике» начало музыкальной фразы совпадает с сильной, ударной долей такта. Однако далеко не во всех мелодиях дело обстоит только таким образом. Часто фраза начинается с одной

или нескольких слабых, так называемых *затактовых нот* (или просто — затакта). В «Молодежной», например, каждое из пяти построений, расчлененных в соответствии с масштабной структурой  $2+2+1+1+2$ , начинается с затакта, состоящего из двух

восьмушек .

Однако встречаются мелодии, в каждой из которых количество нот затакта неодинаково для всех построений (фраз, мотивов или предложений) этой мелодии.

Здесь мы видим, что в нотной записи тактовая черта не служит границей между двумя соседними построениями (фразами, предложениями и т. п.) — она лишь показывает, что непосредственно за нею следует самая сильная доля такта.

Таким образом, мелодия или отдельная музыкальная фраза не всегда начинается с сильной доли такта (ударной ноты) — она может начинаться и с затакта. *Затакт* — это слабая часть такта, с которой начинается фраза. Затакт образует неразрывное целое с сильной частью последующего такта.

Слушая мелодию, мы можем и не знать ее масштабную структуру. Но, несмотря на это, мы ясно чувствуем расчленение на отдельные построения и всегда можем выделить в мелодии предложения, фразы, мотивы. И даже при прослушивании одного лишь ритма мелодии песни в большинстве случаев ощущается расчленение мелодии.

Какими же средствами достигается четкое разделение мелодии на составляющие ее части? В «Чижике», например, две наиболее долгие ноты, будучи более весомыми, чем все другие, и создавая впечатление остановки, способствуют расчленению мелодии на два предложения.

Кроме того, весьма способствуют впечатлению расчлененности *повторения* отдельных ритмических и мелодических фигур, или групп нот. В любой мелодии повторяются некоторые ритмические или мелодические фигуры. Так, в «Чижике» ритм первых четырех тактов в точности повторяется в последующих четырех тактах, а мелодическая фигура, образованная первыми двумя нотами в первом такте (слово «Чи-жик»), повторяется в следующих двух нотах — во втором такте (слово «ши-жик»).

В других мелодиях часто можно встретить несколько видоизмененное повторение мелодического оборота, например, расположенного выше или ниже первоначального на несколько ступеней. Такое повторение называется *секвенцией*. В «Молодежной» И. Дунаевского, например, первые два такта мелодии весьма сходны с отрезком мелодии, состоящим из третьего и четвертого тактов. При прослушивании этих двутактовых фраз порознь кажется, что это — одна и та же мелодическая фигура. Сходство этих фигур обеспечивается тем, что их ритм и последователь-

ность интервалов совершенно одинаковы, и различие состоит лишь в высоте: второй отрезок расположен на три ступени выше первого. Точно так же шестой такт является секвенцией пятого (см. рис. 3.7).

Другой тип видоизмененной повторности — *варьирование*. О способах и закономерностях варьирования первоначальной мелодической фигуры будет сказано дальше в § 3.3. Здесь же мы ограничимся лишь одним примером варьирования мелодической и ритмической фигуры, образованной первыми двумя тактами мелодии песни Л. Книппера «Полюшко-поле» (рис. 3.8). В песне ясно слышится то общее, что объединяет мелодии двух первых и двух последующих тактов. Изменение ритмической фигуры первого такта в третьем такте (что вызвано стихотворным ритмом) повлекло за собой изменение и мелодической линии. Однако при

Л. Книппер. «Полюшко-поле»

Рис. 3.8. Пример вариационного развития в мелодии.

этом высоты нот на соответствующих долях такта (метрических акцентах) остались неизменными. Это соответствие на рис. 3.8 отмечено стрелками.

Повторность ритмических и мелодических фигур (точная или видоизмененная) является закономерностью структуры и всегда встречается в различных мелодиях. Смысл этого заключается в том, что наш слух воспринимает новое лишь в сопоставлении со старым, и поэтому для лучшего усвоения, запоминания, требует периодического повторения каких-либо интонаций, напевов. Кроме того, повторность, особенно видоизмененная, является важным фактором развития мелодии, усиливая впечатление движения, динаминости.

Принцип повторности встречается не только в музыке. Так, в разговоре, чтобы выделить какое-то важное слово, мы часто повторяем его (точная повторность). Одну и ту же мысль мы можем выразить сначала одним предложением, а затем, подчеркивая ее важность, другим (видоизмененная повторность).

Переходя к рассмотрению следующей стороны мелодии, проигрываем «Чижика» на рояле или аккордеоне. Оказывается, это удается сделать на одних белых клавишах. А теперь попробуем сыграть не всю мелодию, а лишь половину ее, оборвав игру на середине, на ноте *ре* (слово «был»). Мы испытываем чувство незаконченности мелодии и желание продолжить ее. Здесь звук *ре* звучит

как-то неустойчиво, и поэтому создается впечатление незавершенности мелодии. Попробуйте вместо *ре* сыграть звук *до* и вы убедитесь, что именно звук *ре* и создает впечатление неустойчивости и незавершенности мелодии.

Если теперь уже в конце мелодии сыграть не *до*, а, например, *фа* или *си*, также не будет благозвучия, завершенности. Последняя нота всегда «хочет» быть нотой *до*. Оказывается, *до* — самая устойчивая нота этой мелодии, а любая мелодия, как правило, кончается именно на самом устойчивом звуке, потому что только в этом случае создается впечатление завершенности мелодии, ее законченности. Обратите внимание на интересное поведение ноты *си*, стоящей перед *до* в конце песни. Если прервать игру «Чижика» на этой ноте и даже, более того, вместо трех последних нот *до* спеть *си*, ощущается крайняя неустойчивость, острота. Она как бы «тянется» к ноте *до* и, как говорят музыканты, разрешается в ноту *до*.

Таким образом, выясняется, что одни звуки мелодии более устойчивы, другие — менее, третьи — неустойчивы; при этом одни звуки как бы тяготеют к другим, разрешаются в некоторые из них. Такая организация устойчивых и неустойчивых звуков является одной из наиболее важных сторон мелодии (и вообще музыки), которая называется *ладом*. Наиболее устойчивый звук — первая ступень лада. Если же мелодию можно сыграть лишь на одних белых клавишах и самым устойчивым звуком (тоникой) будет *до*, как, например, в «Чижике», то этот лад или, точнее, ладотональность называется *До мажором*. Или, как еще говорят, эта мелодия написана в тональности *До мажор*.

Система музыкальных звуков, образуемая последовательностью основных ступеней лада, называется *диатоникой* (например, последовательность белых клавиш рояля — *до, ре, ми, фа, соль, ля, си*).

Существуют и другие типы лада, однако наиболее распространены мажор и минор. Ладовая основа имеет большое значение для восприятия музыки на слух. Закономерности ладовой стороны позволяют не только проиграть мелодию на каком-нибудь музикальном инструменте, например на рояле, но и легко пропеть ее (ведь проиграть на рояле можно любой набор звуков, который далеко не всегда будет музикальным). Основанные на естественном требовании нашего слуха эти закономерности как бы дают «настройку» нашему слуховому восприятию, облегчая усвоение музыки. Поэтому ладовая сторона и является одной из наиболее важных сторон мелодии. Отдельные закономерности ладовой стороны также создают впечатление расчленения мелодии на отдельные части, построения и фразы, а также ее общей логической завершенности, целостности.

Разумеется, правила или закономерности мелодии и вообще музыки не носят абсолютного характера и не должны иметь ме-

ста во всех, без исключения, мелодиях. Именно сочетание тех или других закономерностей и характеризует различные стили или жанры музыки, отличая один от другого. И в этом смысле несоблюдение или даже нарушение различных закономерностей является своеобразной, весьма характерной закономерностью музыки и, в частности, мелодии.

Здесь упомянуты только некоторые наиболее общие и простые закономерности, чтобы дать лишь известное представление об их характере. Существует множество других закономерностей и принципов внутренней организации звуков мелодии, присущих тому или иному жанру музыки или стилю композитора, о которых мы не будем здесь говорить.

### § 3.3. Вариационное развитие мелодии и заимствование музыкальных тем

*Приемы вариационного развития. Перенос инвариантной структуры при вариировании мелодии. Использование заимствованных музыкальных тем в произведениях профессиональных композиторов. Хоралы Баха. Осознанное и неосознанное заимствование. Тема «рококо» П. Чайковского. «Молодежная» И. Дунаевского. Песенные мелодии советских композиторов. Варьирование заимствованных элементов — общий принцип художественного творчества.*

Видоизмененная повторность, как уже было показано в § 3.2, способствует запоминанию и усвоению мелодических оборотов, а также облегчает восприятие мелодии в целом. В то же время она вносит разнообразие, привлекает элементами новизны и является средством динамического развития композиции.

Видоизмененная повторность встречается в различных приемах вариационного развития музыкального сочинения, при вариационном изменении как некоторого оборота внутри мелодии, так и (в более крупных масштабах) некоторой композиции целиком (случай вариации на тему).

В основе видоизмененной повторности и, следовательно, различных приемов вариационного развития лежит перенос некоторых инвариантных отношений, или инвариантной структуры. Перенос инвариантной структуры из темы в вариацию способствует тому, что при восприятии на слух в вариации сохраняется впечатление первоначальной музыкальной темы, ощущается постоянная связь с ней. И это происходит, несмотря на изменение музыкального размера, ритма, ладотональности, других элементов и даже самой мелодической линии. В то же время изменение некоторых (или даже одного) элементов при полном сохранении других сторон может изменить мелодию до неузнаваемости.

Простейшим примером служит гамма с различными ритмическими оформлениями. На рис. 3.9 приведены два отрывка мелодий с одинаковым гаммообразным восходящим движением, но с

разными метроритмами, что совершенно меняет характер звучания мелодий. На рис. 3.10 даны отрывки мелодий двух популярных песен, в которых видны совпадающие между собой по ритму и звуковысотной линии (начиная с ноты *до* в пятом такте этих отрывков) мелодические фигуры, представляющие собой нисходящее гаммообразное движение. Звуковысотный диапазон гаммообразного движения во всех этих примерах, как видно из рис. 3.9 и 3.10, равен интервалу октавы или более.



Рис. 3.9. Пример одной и той же мелодической фигуры — восходящее гаммообразное движение — с разными ритмами.

Изменению характера композиции может способствовать и одна лишь передвижка тактовых черт на новые места при полном сохранении мелодической линии. Так, на рис. 3.11 приводятся

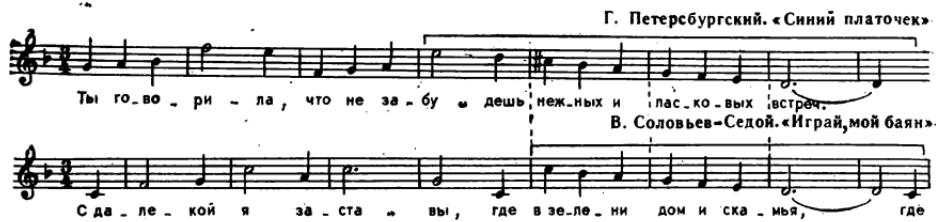


Рис. 3.10. Пример нисходящего гаммообразного движения с одинаковым ритмом.

отрывки темы (первая строка) и второй вариации (вторая строка) из второй части трио П. Чайковского «Памяти великого артиста».



Рис. 3.11. Отрывки темы и вариации — передвижка тактовых черт и изменение метра (тактового размера).

В гл. 1 уже описывался пример орнаментальной, или фигурационной, вариации мелодии (см. рис. 1.8). Эту вариацию сочи-нила электронная вычислительная машина БЭСМ-6.

Рассмотрим теперь более известный пример вариации такого типа. На рис. 3.12 приводятся отрывки темы и второй вариации из Крейцеровой скрипичной сонаты Л. Бетховена. Эту вариацию отличают орнаментальные украшения каждой опорной (инвариантной) ноты. Каждая восьмушка темы при варьировании дробится на четыре части, образуя квартоль (на рисунке каждая такая квартоль вариации расположена под соответствующей ей нотой темы). В каждой квартоли одна или более нот сохраняют высоту соответствующей ноты темы, что и создает впечатление сходства темы и вариации. С другой стороны, дробление нот темы на квартоли и орнаментальные украшения (ноты квартоли, отличные по высоте от опорных) создают впечатление новизны, динамики, стремительности.

А вот еще один любопытный способ варьирования мелодии.

На рис. 3.13 записаны друг под другом отрывки темы и шестой вариации из «Вариаций на тему рококо» П. Чайковского. (Для облегчения сравнения вариация здесь транспонирована в одноименную с темой тональность.) Сравним начало вариации с темой. Ритмы этих мелодий полностью совпадают между собой. Замечаем, что их мелодические линии различны и совпадают между собой лишь в отдельных нотах. Внутренние интервальные отношения (последовательности интервалов) также не совпадают.

Однако при всем различии этих двух мелодий при прослушивании улавливается их сходство, ощущается непосредственная связь между ними. Как мы уже выяснили, вторая мелодия не является секвенцией первой. Но обращает на себя внимание следующая закономерность, несколько схожая с секвенцией. Здесь сохраняются не интервалы, как в секвенции, а направления движения мелодической линии, выражаемые знаками + (движение вверх) или — (движение вниз) интервалов между соседними звуками. Так, в мелодиях на рис. 3.13 последовательности знаков интервалов между первыми шестью нотами имеют вид —, +, —, —, +. Иначе говоря, при таком способе варьирования сохраняются не величины интервалов, а знаки интервалов между соседними нотами на протяжении всей мелодии (окончание первой фразы в счет не идет, так как здесь сказывается более тесная связь нот при разрешении). Такой способ преобразования мелодии будем называть *знакомой секвенцией*.

Из рассмотренных примеров видно, что сохранение в вариации впечатления первоначальной темы — образа темы и непосредственная связь с этой темой вызваны наличием определенных элементов или внутренних отношений элементов, которые остаются неизменными при различных трансформациях темы. Этими неизменными элементами, или *инвариантами преобразования*,

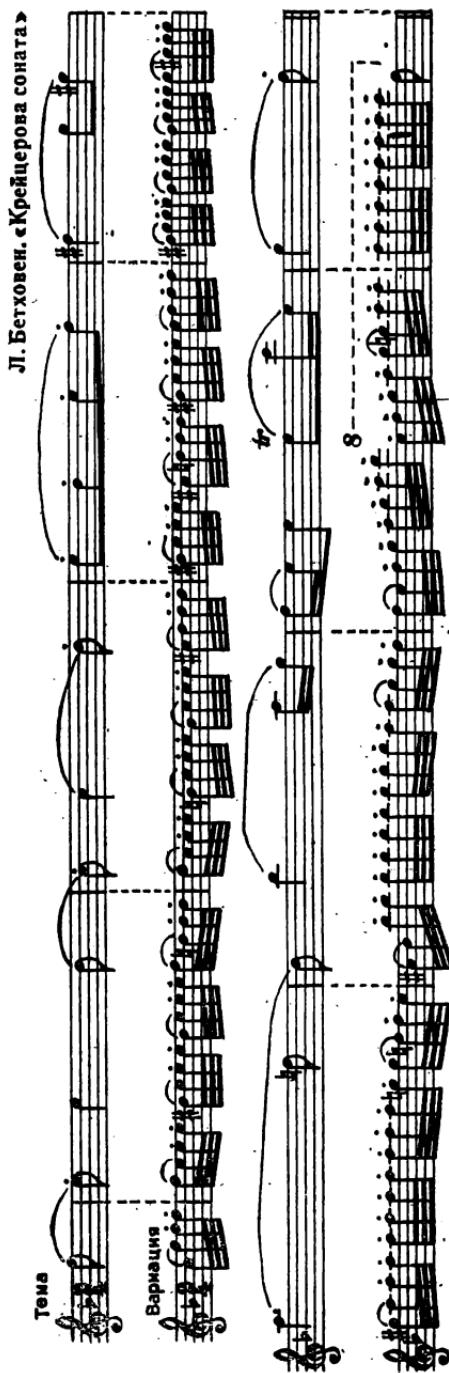


Рис. 3.12. Пример орнаментальной, или фигурационной, вариации мелодии.

П. Чайковский. «Рококо»

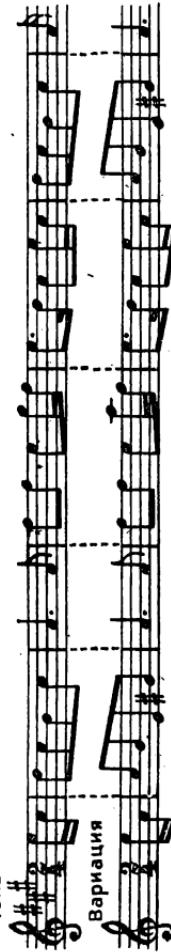


Рис. 3.13. Отрывки темы (верхняя строка) и вариации (нижняя строка) — пример знаковой секвенции.

в первых четырех примерах (рис. 3.9—3.12) была мелодическая линия, а в вариации «Рококо» (см. рис. 3.13) — знаковой секвенции темы — последовательность знаков интервалов с сохранением высот опорных звуков. Другие способы или приемы варьирования будут описаны дальше в § 3.4 при рассмотрении элементарных преобразований мелодии.

Более сложные примеры варьирования можно встретить в тех случаях, когда композиторы-профессионалы используют в своих произведениях какие-нибудь известные или ранее сочиненные мелодии. Этот процесс может быть как сознательным, так и неосознанным. В связи с этим особый интерес представляет то, что называется *заимствованием* в музыке. Заимствование и последующая трансформация (варьирование) музыкальных тем при сочинении музыкальных произведений не являются plagiatом в широком понимании этого слова. Многие композиторы сознательно использовали в своих сочинениях известные мелодии, большей частью мелодии народных песен. Например, мотив «Чижика» в арии царя Додона из оперы Римского-Корсакова «Золотой петушок» или тема «Во поле береза стояла» — в симфонии Чайковского.

Прецеденты обращения к народной — уличной, или массовой, музыке мы находим еще в XVI веке при создании серьезнейших тем — духовной музыки. Так, в протестантских хоралах широко использовались мелодии популярных песен зачастую фривольного содержания. Об этом говорит и название одного такого сборника хоралов, вышедшего во Франкфурте в 1571 г.: «Уличные песни, песни кавалеров и герцогов, превращенные в песни христианские и нравственные, дабы со временем искоренить дурную и досадную привычку петь безнравственные вредные песни на улицах, в полях, в домах, заменив их хорошими, душеспасительными духовными песнями, здесь приложенными» (В. С. Галацкая, 1957; А. Швейцер, 1964).

Заимствованные из народной светской музыки формы, песенные и танцевальные мелодии широко использовал в своих произведениях (кантатах, ораториях, хоралах) Иоганн Себастьян Бах. Так, например, немецкий композитор Ханс Лео Хаслер издал в 1601 г. сборник светских песен (мадrigалы, канzonетты). Среди них была любовная песня «Я смущен душой, и дева нежная тому виной». Мелодия этой песни стала основой погребального хорала «О глава, истекающая кровью» и неоднократно использовалась Бахом в его оратории «Страсти по Матфею» (1729). Подобное происхождение имеют и другие его хоралы. Любовная песенка «Попшел я было гулять» превращается в хорал «Не оставляя Господа», а песня «Смутилось сердце» — в похоронный хорал (В. С. Галацкая, 1957).

Обнаруживается примечательная закономерность. В лучших, наиболее значительных произведениях композиторов-классиков

ощущается близость к народным мелодиям, к их мелосу, гармоническому складу и т. п. Это не обязательно переработки народных мелодий, их своеобразные преломления, но и новые мелодии, по духу близкие к народным. В этом смысле примечательно программино значимое высказывание М. И. Глинки: «Создает музыку народ, а мы, художники, только ее аранжируем» (Е. С. Райзе, 1969).

Для таких аранжировок композиторы не всегда используют лишь готовую, известную мелодию. Заимствуются и другие формы и выразительные средства музыки — гармония, аккордовый склад музыки, характерные мелодические интонации и т. п., но это заимствование проявляется не столь наглядно, как использование мелодии.

Не исключено, что композиторы, часто не осознавая этого, сочиняют свои мелодии как бы на фоне каких-то известных мелодий, гармонической основы, на которые накладывается сочиняемая мелодия. Элементы первоначальных мелодий-прототипов и их гармонической основы служат при этом инвариантами. Возможно, что именно по этой причине композиторы иногда бессознательно используют тот или иной мелодический оборот известной песни, а то и целую мелодию в своем произведении, и сами не подозревают о факте такого заимствования темы (случай неосознанного заимствования). При этом первоначальная мелодия часто трансформируется в мелодию нового стиля.

Один из наиболее ярких примеров такого рода — сочинение П. Чайковским темы «рококо» для своих гениальных виолончельных вариаций. «Вариации на тему рококо» — произведение композитора для виолончели с оркестром. Особую известность у любителей музыки получило оно в последние десятилетия — особенно благодаря тому, что, начиная с 1962 г., в рамках Международного конкурса музыкантов-исполнителей имени П. И. Чайковского проводится конкурс виолончелистов. Каждый виолончелист, участник третьего тура, по условиям конкурса обязательно играет «Вариации на тему рококо».

Немецкий музыкальный критик Штейн в своей монографии, посвященной жизни и творчеству П. Чайковского (Р. Штейн, 1927), приводит следующий разговор между композитором и его другом виолончелистом В. Фитценгагеном \*): «Знаешь ли ты, что такое „рококо“?» — спросил однажды Петр Ильич. Фитценгаген кивнул головой. Пауза. «Я думаю, — сказал Чайковский, — это легкая безмятежная радость (schwebende Heiterkeit)...» [и он]

\* ) Вильгельм (или, как его называли в России, Василий Федорович) Фитценгаген — профессор Московской консерватории (1870 — 1890 гг.), выдающийся виолончелист. Под влиянием постоянных просьб Фитценгагена П. И. Чайковский сочинил «Вариации на тему рококо» (1876 г., opus 33), которые и посвятил В. Ф. Фитценгагену — их первому исполнителю в России (1877 г.) и за границей (1879 г.) (Л. Гинзбург, 1965).

напел про себя небольшую мелодию, вроде гавота (цит. по книге: А. Будяковский, 1935).

Поразительные ассоциации — «легкая, безмятежная радость» — ведь в сознании композитора в это время перевоплощалась в стиле «рококо» мелодия *легкой, безмятежно-раздольной* русской народной песни «Вдоль по Питерской», о чем, по-видимому, композитор и не подозревал \*). В том, что тема «рококо» возникла из мелодии «Вдоль по Питерской», можно убедиться при визуальном сравнении этих двух мелодий. На рис. 3.14 видно совпадение высот нот, отмеченных волнистой линией, и метрических акцентов. Но то, что видят глаз, не всегда слышит ухо, и при прослушивании этих двух мелодий нелегко уловить их сходство, так как оно маскируется неинвариантными элементами.



Рис. 3.14. Пример заимствования — использование мелодии народной песни и ее варирирование в творчестве профессиональных композиторов.

Инвариантные элементы, перенесенные из мелодии «Вдоль по Питерской», маскируются элементами, характерными для стиля «рококо».

Традиции композиторов-классиков, использующих в своих произведениях элементы народной музыки, таких как М. Глинка, П. Чайковский, Н. Римский-Корсаков, С. Прокофьев, Д. Шостакович и другие, обнаруживаются и в творчестве современных композиторов-песенников. Среди них особенно следует отметить И. Дунаевского, который в своем творчестве весьма талантливо использовал известные мелодии (чаще — старинных бытовых романсов и народных песен) и, накладывая их на новый ритм, переплавлял в бодрые, жизнерадостные мелодии, создав по-существу массовую песню нового стиля. Пример такой песни приведен на рис. 3.15 (И. Нестьев, 1955). Из рисунка видно, что мелодия песни И. Дунаевского «Молодежная» из кинофильма «Волга-Волга» является вариацией мелодии русской народной песни «По Дону гуляет...». Несмотря на то, что мелодические линии этих песен полностью совпадают почти всюду на протяжении всей мелодии и мелодии отличаются «всего лишь» ритмом (правда, при сохранении метрических акцентов), это — совершенно разнохарак-

\*). Этот вывод подтверждается тем, что ни исследователи творчества П. Чайковского, ни сам композитор нигде не сообщают о том, что тема «рококо» имеет прототип — мелодию «Вдоль по Питерской», хотя любой известный случай подобного заимствования многократно описывается в музыковедческой литературе.

терные мелодии. Если первая — раздольная, напевная, размером  $3/4$ , то вторая — острая, стремительно-плясовая, размером  $4/4$ .

Мелодии «Рококо» и «Молодежной» — редкие примеры заимствования, когда преобразуются первоначальные мелодии-темы, взятые целиком, на всем их протяжении от начала до конца. При этом тема значительно маскируется новыми элементами — ритмом, метром и т. д.

Более общий случай заимствования, распространенный в композиторской практике (преимущественно песенной), сводится к

Рис. 3.15. Еще один пример заимствования. Мелодические линии обеих мелодий — темы и вариации — совпадают на всем их протяжении. Изменение метроритма привело к совершенно новому выразительному характеру вариации.

переносу в новую мелодию отдельных частей темы, т. е. по существу к цитированию первоначальной мелодии, чаще — без варьирования (или с незначительными видоизменениями) самих цитат. Маскировка достигается перестановкой взятых кусков, некоторой их разработкой, а также добавлением других мелодических фигур. Примером такого заимствования может служить «Песня о тревожной молодости» А. Пахмутовой из кинофильма «По ту сторону» (1958 г.). Не вызывает сомнения, что мелодия этой широкоизвестной ныне песни написана под впечатлением и большим влиянием «Кантаты» А. Александрова «От края до края», весьма популярной в сороковых и начале пятидесятых годов. Это видно из сравнения обеих мелодий, приведенных в нотной записи на рис. 3.16 (для наглядности обе мелодии транспонированы в одну тональность).

Начало второй мелодии (мелодия *P* на рисунке) в точности совпадает с началом первой (мелодия *A* на рисунке). Мелодия А. Александрова цитируется в разных местах мелодии А. Пахмутовой; цитируются отдельные куски мелодии, взятые либо в чистом виде, либо в секвенции, мелодические и ритмические фигуры; на протяжении всей мелодии видно совпадение многих опорных нот; одинаков метр обеих мелодий. На рисунке вертикальный перенос инвариантных высот нот (см. ниже § 5.2) отмечен вертикальными стрелками. Совпадающие отрывки мелодий во второй паре строк подчеркнуты волнристой горизонтальной линией: для наглядности этот отрывок из мелодии А. Александрова (такты 8, 9 и 10) выписан дополнительно под соответствующим местом

мелодии А. Пахмутовой \*). Совпадающая ритмическая фигура (два такта) и видоизмененная мелодическая фигура (частично в секвенции) отмечены горизонтальной чертой. Все эти инвариантные элементы создают впечатление сходства, общности обеих мелодий. Однако новые слова, видоизменения в ритме и звуковысотной линии, а также перестановка заимствованных кусков выполняют маскирующую функцию — не так-то просто оказалось услышать неизменные, инвариантные, элементы, которые сохранились при трансформации первой мелодии. И это несмотря

Рис. 3.16. Более общий случай заимствования, распространенный в композиторской практике,— цитирование отрывков мелодии массовой песни.

на то, что перед появлением песни А. Пахмутовой (1958 г.) «Кантата» А. Александрова была, пожалуй, одной из наиболее часто исполняемых и известных песен. Маскирующая роль новых элементов, внесенных в первоначальную мелодию при ее преобразовании, настолько велика, что даже в специальных работах музыковедов, где рассматривается песня Пахмутовой, не были отмечены ни сам факт заимствования, ни тождественность указанных интонаций (см., например, Л. Кулаковский, 1962, с. 206).

Если в рассмотренных выше мелодиях П. Чайковского и И. Дунаевского мы видим довольно сложное преобразование первоначальной темы, ее переплав, то в мелодии Пахмутовой это делается значительно проще — без изменения переносятся метр, отдельные мелодические и ритмические фигуры, а в некоторых

\* ) Как видно из рис. 3.16, трехтактовая мелодическая фигура строки *P* является вариантом соответствующей мелодической фигуры строки *A*. Некоторое несовпадение числа длительностей и, следовательно, мелодических линий этих фигур вызвано разным числом слов в соответствующих стихотворных текстах песен. Интересно отметить, что несовпадающие отрывки мелодических линий подчиняются двум разным принципам заполнения интервала между инвариантными высотами, описанным в § 5.2.

местах производится точное цитирование отрывков первой мелодии. Благодаря этому в мелодии Пахмутовой и узнать заимствованные отрывки проще, чем в мелодиях Чайковского или Дунаевского.

Наиболее яркие интонации песни Александрова, пусть неосознанно, но были услышаны при исполнении песни Пахмутовой. Где-то в глубине сознания они были восприняты слушателями как знакомые и близкие. Не исключено, что это повлияло и на популярность песни Пахмутовой у массового слушателя. Психологически это нетрудно объяснить: всякая повторность, точная или видоизмененная, облегчает восприятие, усвоение и запоминание.

Такой же случай преобразования заимствованной мелодии мы видим и в мелодии вальса Э. Колмановского (песня «Черное и белое» из телефильма «Большая перемена»). Эта мелодия также написана под влиянием и впечатлением одного из наиболее известных старинных романсов — романса А. Гуэрчиа «Нет, не любил он...». Метр и ритм обеих мелодий тождествен на всем их протяжении. На рис. 3.17 приведены отрывки этих песен — начало второго куплета романса А. Гуэрчиа (первая строка — Г)

Рис. 3.17. Еще один пример заимствования — перенос ритма и точное цитирование отрывка мелодии старинного романса.

и начало песни Э. Колмановского (вторая строка — К). Из этого рисунка видно, в частности, точное цитирование четырехтактового отрывка мелодии Гуэрчиа в мелодии Колмановского (на тексте: «—стье нам выпадает. Часто простое»). Начало второй мелодии — точное секвенцирование заимствованного отрывка мелодии Гуэрчиа из первого куплета (не приведенного на рисунке).

Примеров заимствования такого рода в творчестве самых разных композиторов можно привести очень много.

Многие композиторы осознанно или неосознанно, хотят они этого или не хотят, в качестве основы или темы используют при сочинении мелодий для своих произведений известные мелодии народных песен или профессиональных сочинений. Механизм трансформации первоначальных мелодий-тем подобен тому, который реализуется алгоритмом, описанным в гл. 5. Из того, что композитор не сообщает о факте заимствования первоначальной темы для сочинения своих мелодий, не следует, что он эту тему не заимствовал. К тому же композитор может и не знать о таком

заимствовании, как, по-видимому, случилось с П. Чайковским при сочинении им темы «рококо» для своих виолончельных вариаций.

Однако во избежание возможных недоразумений заметим следующее. Рассмотренное выше и подобное заимствование музыкальных тем, распространенное в музыкальной практике, не является предосудительным в деятельности профессиональных композиторов, и его не только не следует расценивать как плахиат, но следует выделить как один из способов творчества, поскольку такое заимствование связано с творческой обработкой, существенно отражающей стилевые черты композитора \*).

Подобная творческая обработка исходных тем — варьирование темы (или иначе — перенос инвариантных элементов в новые условия) — наблюдается не только в музыке, но и в других видах художественного творчества — в поэзии, живописи, литературе, кино и т. п. Она встречается как в виде наиболее легко опознаваемого прямого использования цитат («коллаж» по современной терминологии), так и в более или менее замаскированном, творчески обработанном виде. Такое заимствование настолько широко распространено во всех видах художественного творчества (и, по-видимому, не только художественного), что варьирование заимствованных элементов можно считать общим принципом художественного творчества, не всегда осознаваемым творцом.

Можно привести много разнообразных примеров такого рода. Так, например, часто наблюдаемое в поэзии заимствование ритмики стихотворного размера, или метра — определенного соотношения ударных и безударных (сильных и слабых) слогов в стихотворении — по-видимому, происходит неосознанно. Различные ритмические вариации, допустимые в пределах одного и того же стихотворного размера (например, ямбического), разнообразят ритмику стихотворения, способствуя передаче тех или иных оттенков выразительности, и также являются отличительными особенностями авторов (А. Н. Колмогоров, 1968; А. Прохоров, 1964).

Нас не будут интересовать ни психология заимствования музыкальных тем композиторами — побуждающие к этому причины и тому подобные обстоятельства, ни выяснение того, осознанно или неосознанно использовал композитор заимствованную им мелодию. Это тема особого разговора.

Интересен сам механизм преобразования заимствованных мелодий. Ведь очевидно, что даже в случае осознанного заимство-

\* ) Подкрепим это мнение толкованием слова «плахиат», приведенным в Энциклопедическом музыкальном словаре (М., 1966, с. 395). «Плахиат (от латинского *plagio* — похищаю) — заимствование из чужого музыкального, литературного или иного произведения без указания источников. Карается по закону. От этого понимания плахиата следует отличать творческую обработку или цитатное использование музыкальных тем, заимствованных из чужих произведений, народной музыки, широко распространенное в музыкальной практике и называемое в западно-европейской литературе также плахиатом.»

вания темы (когда композитор сознательно использует в качестве прототипа известную ему мелодию) само преобразование осуществляется не по алгоритму и не по формулам, не в результате каких-то «вычислений», а опять-таки неосознаваемым образом. В еще большей степени это проявляется при заимствовании неосознанном, когда нет даже четкого представления о мелодии-прототипе, которую композитор слышит каким-то внутренним слухом. Моделирование феномена транспонируемости на материале музыкальных вариаций позволяет увидеть возможные пути такого преобразования, раскрыть природу и механизм мышления и восприятия.

Подобный механизм переноса инвариантных структур несомненно использует человек в творческой деятельности. Поэтому полученные результаты вследствие их реализуемости и наглядности могут быть полезными при иллюстрации выявленных закономерностей и в других областях творчества. И схема механизма переноса, абстрагированная от смысловой (содержательной) стороны проблемы, может применяться при исследовании разных конкретных видов продуктивной деятельности человека.

#### § 3.4. Принципы варьирования мелодии

*Структура мелодии. Основные стороны и элементы мелодии. Элементарные преобразования мелодии. Вариация. Восприятие темы и вариации. Основные признаки вариации — инварианты, трансформанты и константы. Строгие и свободные вариации. Три условия, необходимые для раскрытия закономерностей переноса инвариантных элементов. Моделирование — способ исследования механизма варьирования.*

Рассмотрим теперь основные принципы транспозиции инвариантных структур в музыке при варьировании мелодий, т. е. принципы преобразования (варьирования) заданной мелодии.

Транспозиция инвариантных структур проявляется в различных приемах вариационного развития музыкального сочинения. Перенос различных внутренних отношений элементов композиции способствует тому, что при восприятии на слух вариаций сохраняется впечатление первоначальной музыкальной темы, ощущается постоянная связь с ней. И это происходит, несмотря на изменение в вариации различных сторон темы — музыкального метра, ритма, ладотональности и других элементов и даже самой мелодической линии темы. Варьирование темы позволяет путем моделирования на вычислительной машине и восприятия синтезированных при этом мелодий-вариаций выявить различные закономерности, связанные с механизмом интуитивного подражания при сочинении, а также узнавания и распознавания типов композиций.

Перечислим необходимые понятия о строении мелодии и ее элементах.

*Мелодия* (тема  $K_0$  или вариация  $K_n$ ) представляет собой период в мажоре или миноре, расчлененный на отдельные построения (предложения, фразы, мотивы) в соответствии с предусмотренными типами структуры.

Организация звуков мелодии подчиняется закономерностям основных сторон мелодии с учетом ее строения, а не исполнения. Мы будем рассматривать закономерности четырех следующих основных сторон мелодии:

а) *Ритмической*, направленной на организацию различных длительностей.

б) *Звуковысотной* (интервально-высотные отношения).

в) *Ладогармонической*, обеспечивающей организацию устойчивых и неустойчивых звуков мелодии. Сочинение мелодии происходит как бы на фоне воображаемого аккомпанемента, звучащего неявно, но с явной гармонической функциональностью (Р. Х. Зарипов, 1971а).

г) *Структурной*. Имеется в виду так называемая масштабно-тематическая структура, предусматривающая организацию повторности ритмических и мелодических фигур (соответственно ритмическая  $S_R$  и мелодическая  $S_M$  структуры), а также расчленение мелодии на отдельные построения — предложения, фразы, мотивы (масштабная структура  $S_N$ ).

Под *элементами* мелодии понимают элементы ее синтаксиса. Перечислим некоторые из них:

- длительность ноты;
- длина такта, ритмической фигуры или отрезка мелодии, выраженные в единицах некоторой длительности, например четверти;
- ритм мелодии или мелодического построения, ритмическая фигура в виде некоторой упорядоченной совокупности длительностей с отмеченными метрическими акцентами (сильная или слабая доля такта);
- музыкальный размер (метр), например, 2/4, 3/4, 4/4, 7/4, 6/8 и т. п.;
- тип опорных, или стержневых (отмеченных), нот, например все сильные доли такта, ноты типа «предыкт-икт» и т. п.;
- высота ноты;
- мелодическая фигура в виде последовательности высот нот;
- интервал между высотами нот (соседних или выделенных определенным образом) во всей мелодии, построении или мелодической фигуре;
- упорядоченная последовательность интервалов между нотами;
- последовательность знаков интервалов между нотами;
- лад (мажор, минор);

— ладогармоническая функция такта, отдельной ноты или мелодической фигуры (принадлежность к аккорду или ладу определяется по опорным долям, не обязательно сильным);

— структура мелодии (ритмическая  $S_r$ , мелодическая  $S_m$ , ладогармоническая  $S_c$ , масштабная  $S_n$ ).

*Отношениями элементов* будем называть внутренние связи между элементами мелодии. Заметим, что отношение элементов мелодии само есть элемент мелодии. Примерами отношений элементов являются следующие:

Мелодическая или ритмическая фигура в виде упорядоченной последовательности высот или длительностей нот.

Последовательность высот опорных, или стержневых, нот, отмеченных в нотном тексте определенным образом (например, сильных долей такта).

Последовательность интервалов между нотами мелодической фигуры.

Последовательность знаков интервалов.

*Элементарным преобразованием* назовем такую операцию, которая осуществляет изменение (трансформацию) какого-либо одного элемента (или отношения элементов) при сохранении всех остальных. Элемент мелодии, который посредством элементарного преобразования изменяется, назовем *трансформантой*.

Такими элементарными преобразованиями будут:

Простое повторение (тождественное преобразование).

Изменение метра (тактового размера) при сохранении метрических акцентов — соответствия между высотами и долями такта (сильная, слабая). В качестве иллюстрации см. на рис. 3.3 марш (размер 4/4) и вальс (3/4) А. Лепина из кинофильма «Здравствуй, Москва!».

Изменение ритма с сохранением метрических акцентов или без него (см. тот же рис. 3.3).

Орнаментальные украшения при сохранении опорных высот. Образцом орнаментальных вариаций может служить вторая вариация из Крейцеровой скрипичной сонаты Л. Бетховена (фрагменты темы и вариации приведены на рис. 3.12).

Секвенция — перенос мелодической фигуры по вертикали ввёрх или вниз с сохранением внутренних интервальных отношений. На рис. 3.7 приведена мелодия песни И. Дунаевского «Молодежная». В этой мелодии третий и четвертый такты являются секвенцией первых двух тактов с шагом секвенции, равным кварте, а шестой такт — секвенцией пятого с шагом, равным секунде. Секвенция всей мелодии с сохранением интервальных отношений не только по названию интервалов, но и с учетом числа содержащихся в них полутонов, есть транспонирование мелодии в другую тональность.

Знаковая секвенция — перенос последовательности знаков интервалов в некоторой мелодической фигуре, когда величины ин-

тервалов, вообще говоря, меняются. Примером знаковой секвенции служит отрывок вариации, показанный на рис. 3.13. Вариация транспонирована в одноименную с темой тональность, что сделано для облегчения сравнения.

Изменение лада (в пределах мажора — минора).

Изменение масштаба длительности нот ритмической фигуры с сохранением отношений долгих и кратких длительностей.

Изменение высоты звука в пределах одной и той же гармонической функции. Иначе говоря, замена одного аккордового звука другим из того же аккорда (см. рис. 3.8).

Более сложные виды преобразований получаются в результате сочетания нескольких элементарных.

*Преобразование* мелодии  $K_0$  в мелодию  $K_v$  будем называть такое изменение (трансформацию) одних элементов мелодии  $K_0$  путем применения элементарных преобразований, при котором в  $K_v$  сохраняются другие элементы мелодии  $K_0$  или некоторые отношения между ними. Иначе говоря, осуществляется транспозиция (перенос) некоторых элементов. Эти неизменные элементы будем называть *инвариантами преобразования*, а  $K_v$  — *вариацией темы*  $K_0$ .

Вариация  $K_v$  темы  $K_0$  характеризуется тремя основными признаками.

*Инвариантами*  $I_0$  — специфическими особенностями темы  $K_0$ , носителями некоторого образа темы. Это те неизменные элементы, перенос которых осуществляется при преобразовании темы. Набор инвариантов  $I_0$  для одной и той же темы  $K_0$  и разных вариаций  $K_v$  может выбираться по-разному. Иначе говоря, тема может иметь несколько образов, характерных для нее. Каждый инвариант может характеризовать тему с разных сторон, но может быть и носителем некоторого одного ее образа (пример, когда в мелодии-теме  $K_0$  рассмотрены два инварианта — носителя одного и того же образа, приведен в § 1.2).

*Трансформантами*  $T_v$  — элементами темы  $K_0$ , подлежащими элементарным преобразованиям в вариации  $K_v$ . Трансформанта — элемент, маскирующий наличие в вариации инвариантов темы. При преобразовании темы в вариацию может быть несколько трансформант.

*Константами*  $C_v$ , т. е. некоторым элементом, специфичным для  $K_v$ . Это определенная мелодическая или ритмическая фигура или оборот, некий принцип варьирования элементов (например, определенного типа звуковысотные украшения при распевании слов, движение триолями) и т. п. Этой константой является элемент (или другая характеристика вариации), специфический для данной, конкретной вариации и определяющий ее лицо, ее отличие от других вариаций. Константа в вариации встречается многократно и имеет одно и то же значение. Таким образом, повторность в вариации — основное и необходимое свойство константы.

Как уже говорилось выше, вариация обладает тем качественным свойством, что при прослушивании в ней, вообще говоря, узнается тема и сохраняется впечатление, или образ этой темы. Вследствие переноса определенных интервалов  $I_0$  при преобразовании темы в вариации непосредственно ощущается постоянная связь с темой, элемент повторности, постоянства. В то же время преобразование темы (благодаря трансформантам  $T_b$  и константам  $C_b$ ) неизбежно вносит в вариацию элемент разнообразия, новизны. Маскируя наличие в вариации  $K_b$  инвариантов  $I_0$  темы  $K_0$ , т. е. маскируя образ темы и способствуя отдалению впечатления от темы, это преобразование часто до неузнаваемости изменяет тему.

Покажем на простом примере, как сильно изменяет хорошо знакомую мелодию трансформация лишь какого-нибудь одного элемента (этот пример мы уже рассматривали в гл. 1 по другому поводу).

Так, при прослушивании мелодии  $K_1$ , приведенной на рис. 1.8, нелегко узнать в ней вариацию весьма популярной и, безусловно, всем хорошо известной мелодии. Попробуйте проиграть ее и вы убедитесь в этом. Здесь очень наглядно проявляется маскирующее значение трансформант и констант, и при восприятии на слух это очень заметно. При сравнении же мелодии  $K_1$  и порождающей ее темы  $K_0$  в нотной записи (см. рис. 1.8) сразу же обнаруживается их близость. В самом деле, это пример орнаментальной, или фигурационной, вариации — наиболее простой ее тип. В вариации  $K_1$  высота первой доли в каждой половине такта совпадает с высотой ноты, расположенной в теме  $K_0$  на таком же расстоянии от начала мелодии. Это и есть инвариант преобразования — неизменная последовательность высот в начале каждой половины такта (на рис. 1.8 они расположены одна под другой по вертикали).

Однако новые элементы в вариации способствуют отдалению образа вариации от образа темы. Здесь это квартоль (состоящая из четырех восьмушек, при условии несовпадения между собой высот соседних нот), являющаяся константой для вариации, а также, как следствие, новый ритм и новая мелодическая линия всей мелодии, служащие трансформантами. Наиболее сильное маскирующее влияние оказывает здесь мелодическая фигура, построенная на каждой ритмической квартоли. В самом деле, если бы в каждой квартоли высоты нот были одинаковы, то в такой вариации тема была бы узнана легко. Доказательством может служить другая вариация той же темы, которая приведена на рис. 1.8 — мелодия  $K_2$ .

В процессе преобразования мелодии можно применять разные элементарные преобразования, вносить в вариацию разные константы. При этом инвариантные элементы, которые переносятся в вариацию без изменения, также могут быть разными. Разные

наборы инвариантов  $I_0$ , трансформант  $T_b$  и констант  $C_b$  при преобразовании одной и той же темы  $K_0$  приводят и к разным вариациям  $K_b$ , в которых при восприятии по-разному проявляется действие маскирующих элементов на инвариантные элементы, на образ темы.

Следовательно, использование при преобразовании разных наборов инвариантов, трансформант и констант влияет на степень близости, или сходства, вариации и первоначальной мелодии — темы. В зависимости от этой степени близости вариации разделяются на *строгие* и *свободные*. Разделение это, вообще говоря, условно, поскольку четкую грань между строгими и свободными вариациями не всегда можно провести.

Строгие (преимущественно орнаментальные, или фигурационные) вариации характеризуются в первую очередь сохранением формы темы, общих контуров мелодии, особенно ее основных, опорных, или стержневых звуков. В них применяются различные мелодические или ритмические орнаментальные украшения, или фигурации; могут также изменяться ладотональные элементы, тактовый размер и т. п.

В свободных вариациях широко используются новые элементы, значительно изменяющие форму темы. При сохранении общего впечатления сходства с темой свободные вариации иногда сильно контрастируют с ней. Примером свободных вариаций могут служить упоминавшиеся виолончельные «Вариации на тему рококо» П. Чайковского.

Как уже говорилось ранее, при прослушивании вариации и сопоставлении ее с темой всегда ощущается новое благодаря трансформации темы и применению специфической для вариации фактуры. Вместе с тем в вариации чувствуется постоянная связь с темой вследствие переноса инвариантов преобразования. Вследствие маскирующей функции трансформант и констант первоначальную мелодию не всегда легко узнать в вариации. В других же случаях, несмотря на внешне почти полное изменение элементов различных сторон, при прослушивании в вариации довольно легко узнается тема. В связи с этим представляет несомненный интерес исследование формальной зависимости степени близости вариации и темы как от различных трансформант и констант, так и от неизменяющихся элементов — инвариантов преобразования.

Поскольку неизвестны другие способы восприятия звучащего материала, восприятие на слух (*аудиальное восприятие*) было и остается важным этапом таких исследований.

Для раскрытия закономерностей механизма транспозиции инвариантных элементов при варьировании мелодии-темы необходимо выполнение следующих трех условий:

1. Знание тех инвариантов  $I_0$  и трансформант  $T_b$ , при которых тема  $K_0$  преобразуется в вариацию  $K_b$ , а также констант  $C_b$ , характеризующих особенности разных вариаций.

2. Наличие большого количества различных, разнообразных по типу, хотя в некотором смысле и однородных (например, по структуре, по синтаксической сложности и т. п.) мелодий  $K_a$  и  $K_b$  для проведения массовых экспериментов по восприятию на слух. Эти опыты по восприятию на слух должны быть массовыми, чтобы исключить случайные ошибки при оценке мелодий. При обработке результатов эксперимента субъективные оценки и мнения отдельных слушателей в массовых экспериментах объективизируются и выводы из эксперимента делаются уже на основе объективизированных, усредненных оценок. Как показывает практика, при этом проявляется устойчивая тенденция средних оценок для разных мелодий упорядочиваться определенным образом.

3. Мелодии не должны быть популярными, хорошо известными, чтобы не вызывать ненужных и даже вредных в таких опытах ассоциаций, связанных с восприятием знакомых мелодий, которые мешают объективно оценивать их. Восприятие мелодий должно происходить в одинаковых условиях, как уже отмечалось при рассмотрении социологического эксперимента по сравнительной оценке мелодий, сочиненных профессиональными композиторами и машиной (см. § 2.2).

Вряд ли можно подобрать мелодии, сочиненные человеком, которые бы подчинялись этим условиям. Зато им удовлетворяют машинные мелодии, получающиеся в результате синтезирования описываемым ниже способом.

## ГЛАВА 4

# ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ МАШИНЕ

---

### § 4.1. Вероятностный алгоритм и модель творчества

*Кодирование элементов. Генератор случайных чисел. Схема синтезирования модели. Вероятностный алгоритм.*

Для проведения экспериментов по моделированию на вычислительной машине продуктивной деятельности одним из наиболее важных является вопрос организации машинной программы. Участие такой программы в проведении экспериментов с достаточно сложными объектами предполагает постоянное совершенствование как методов исследования, так и самой программы. Поэтому один из аспектов этого вопроса — удобство обращения с программой, возможность оперативно вводить в нее и получать необходимые сведения об объекте исследования; видоизменять структуру модели, не меняя самой программы, управлять программой. Иначе говоря, для успешного проведения разного рода экспериментов программа должна быть гибкой в обращении, а, следовательно, структура алгоритма должна учитывать это обстоятельство.

Рассмотрим самые общие принципы синтезирования музыкальной композиции на вычислительной машине.

Все элементы композиции — интервалы, длительности, высота ноты и т. д. — кодируются числами определенным образом (способы кодирования рассмотрены в гл. 5).

Выбор различных элементов композиции (тип структурной организации, закон распределения длительностей или интервалов, нота, аккорд и т. п.) происходит с помощью генератора случайных чисел с использованием соответствующего способа кодирования. Случайные числа предназначены для выбора того или другого элемента композиции в соответствии с определенным законом распределения этого элемента. Примером простейшего генератора случайных чисел (или, точнее, случайных состояний) может служить монета, при бросании которой выпадают два случайных значения — герб и номинал. Обычный игральный кубик служит примером генератора случайных чисел с шестью значениями: 1, 2, 3, 4, 5, 6.

В качестве генератора случайных чисел в машине обычно используется специальная программа, вырабатывающая по определенным правилам последовательность чисел, которая может рас-

сматриваться как случайная последовательность в различных ситуациях, хотя значения чисел в этой последовательности и предопределены тем алгоритмом, который их вырабатывает. В последнем случае такие программные генераторы называют часто генераторами псевдослучайных чисел. В алгоритме синтезирования композиций используется стандартная программа для получения случайных чисел  $D$  с равномерным распределением в промежутке  $[0, 1)$ , т. е.  $0 \leq D < 1$ , которое потом преобразуется с помощью специальных приемов в необходимые случайные распределения.

Синтезирование композиции в самых общих чертах происходит следующим образом.

Имеется набор запрограммированных правил композиции. Генератор случайных чисел предлагает одну ноту за другой, которые как бы пропускаются через фильтр — набор правил. Если нота удовлетворяет этому набору, то она помещается в нотную строку. В противном случае она отбрасывается и вместо нее предлагается другая. И так до тех пор, пока не будет получена законченная композиция, которая и печатается в закодированном виде. Практически же генератор предлагает не целиком всю ноту, а на разных этапах сочинения составляющие ее элементы: длительность или высоту, а также интервал.

Такой способ синтезирования композиции с помощью генератора случайных чисел (закодированных нот) в определенном смысле имитирует деятельность композитора, сочиняющего мелодию. В самом деле — нельзя заранее предвидеть, какой будет следующая нота — она выбирается как бы случайной. Но эта «случайность» выбора на самом деле подчиняется своим закономерностям, которые вносят определенную упорядоченность в распределение нот.

Эти закономерности (включенные в набор правил композиции) отражают особенности музыкального стиля автора, народности, жанра, музыкальной эпохи и т. п. Для каждого из них — свое распределение вероятностей, с какими встречаются те или другие ноты (высоты или интервалы) в нотном тексте музыкального произведения.

Аналогичные особенности проявляются не только в музыке — они характерны и для языка. Криптографам давно известно, что разные буквы появляются в тексте с разной частотой и распределение частот разных букв одного и того же языка довольно устойчиво даже для разных авторов. Однако каждый язык отличается своим распределением частот (см., например, книгу В. Фукса, 1975).

Из описания схемы синтезирования композиции следует, что алгоритм, моделирующий такую систему, должен обладать следующим свойством. Будущее (и конечное) ее состояние не определяется однозначно исходным состоянием и входными данными, по-

скольку различные элементы системы выбираются в процессе переработки исходных данных посредством генератора случайных чисел. Это состояние определяется лишь вероятностями переходов из одного состояния в другое, заданными некоторой таблицей, или матрицей, переходов. Благодаря этому выходные (искомые) величины могут, вообще говоря, оказываться различными даже при одних и тех же начальных данных.

Алгоритм, реализующий такую систему, называется *вероятностным алгоритмом*, в отличие от алгоритма «классического» типа — *детерминированного* алгоритма, результат применения которого к некоторым входным данным целиком и однозначно определяется ими.

Очевидно, что детерминированный алгоритм есть частный случай вероятностного: если в вероятностном алгоритме для любой промежуточной ситуации вероятность одного определенного перехода (в матрице переходов) положить равной единице, а вероятности всех остальных переходов — нулю, то получится детерминированный алгоритм.

Существенным различием детерминированного и вероятностного алгоритмов является то, что второй необходимо включает в себя (или использует) генератор случайных чисел. Поэтому при одних и тех же входных (начальных) данных и исходном состоянии вероятностный алгоритм (в отличие от детерминированного) будет, вообще говоря, порождать разные результаты в разных случаях, например, при использовании в разное время или разными лицами. Это свойство алгоритма является объективным, обусловленным самой природой вероятностного алгоритма.

Здесь, однако, следует иметь в виду следующее обстоятельство. Как уже говорилось, случайные числа, порождаемые программой, на самом деле псевдослучайны и их последовательность предопределена программой — генератором этих чисел. Вследствие этого, если во входные данные включить и значение некого числа (которое является для генератора псевдослучайных чисел начальным и вводится «для затравки»), то при одних и тех же входных данных и исходном состоянии вероятностный алгоритм будет во всех случаях его использования (в разное время или разными лицами) порождать один и тот же искомый (конечный) результат. В этом случае функционирование вероятностного алгоритма не отличается от детерминированного. Если же каждый раз при работе вероятностного алгоритма начальное число для генератора псевдослучайных чисел будет новым или если генератор случайных чисел вырабатывает числа не по программе и они действительно случайны, то вероятностный алгоритм уже не будет вести себя как детерминированный.

Таким образом, алгоритм, имитирующий процесс сочинения музыки, должен быть вероятностным алгоритмом.

## § 4.2. Постоянные и переменные параметры алгоритма

*Постоянные и переменные величины. Примеры: система алгебраических уравнений, телевизор. Формирование программы значениями переменных параметров. Случайные параметры.*

Все данные об объекте исследования, предусмотренные программой, представляют собой некоторые параметры, которые в программе являются постоянными или переменными величинами. Иначе говоря, эти параметры принимают или одно — постоянное, фиксированное для данной программы значение или несколько значений.

Поясним понятия постоянного и переменного параметров сначала на простом примере вычислительной задачи.

Пусть имеется программа для решения системы двух линейных алгебраических уравнений с тремя неизвестными  $x, y, z$ :

$$\left. \begin{array}{l} a_1x + b_1y + c_1z = p_1, \\ a_2x + b_2y + c_2z = p_2. \end{array} \right\} \quad (4.1)$$

Для этой программы параметры «число уравнений» и «число неизвестных» постоянны: они соответственно равны фиксированным значениям 2 и 3.

Пусть теперь составлена стандартная программа для решения системы, состоящей из  $n$  алгебраических линейных уравнений с  $m$  неизвестными  $x_1, x_2, \dots, x_m$ :

$$\begin{aligned} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1m}x_m &= p_1, \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2m}x_m &= p_2, \\ &\dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \dots + a_{nm}x_m &= p_n. \end{aligned}$$

Здесь вследствие ограниченности памяти вычислительной машины целые  $n$  и  $m$  ограничены сверху некоторыми числовыми значениями, фиксированными для данной программы. Для этой программы параметры «число уравнений» и «число неизвестных» являются переменными. Они могут принимать различные целочисленные значения из области допустимых значений. Фиксированными они становятся каждый раз при решении конкретной системы уравнений. Тогда в определенные ячейки машинной памяти засыпаются известные числа  $m$  и  $n$ , которыми и настраивается программа. При решении каждой конкретной системы значения чисел  $m$  и  $n$  постоянны. Иначе говоря, во все те ячейки памяти, которые отведены для чисел  $n$  и  $m$  (в программе таких ячеек может быть довольно много), засыпаются фиксированные числа, равные числу уравнений и числу неизвестных в этой системе уравнений. Частным случаем такой системы может служить приведенная выше система (4.1) двух уравнений с тремя

неизвестными. Тогда стандартная программа формируется числовыми значениями  $n = 2$ ,  $m = 3$ .

Понятия переменного и постоянного параметров можно пояснить и на более привычном и простом примере телевизора (или радиоприемника). Здесь аналогом постоянных параметров (с неизменяющимися для данного телевизора значениями) служат такие параметры телевизора: размер телевизионного экрана, количество каналов, максимальная выходная мощность громкоговорителя, число радиоламп, марка кинескопа, число строк развертки, частота питающего тока (50 Гц).

Переменными параметрами, значения которых можно по желанию менять вращением соответствующих ручек и, установив их в некотором фиксированном положении, более или менее спокойно смотреть и слушать передачу, являются: номер программы (канала), громкость звучания, тембр звучания, яркость изображения, выключатель сети (этот параметр принимает два значения — «включено» и «выключено»).

Любая машинная программа, как и всякий алгоритм, обладает свойством массовости, т. е. применима ко всем объектам некоторого определенного множества. Так, известный еще в школе алгоритм деления одного числа на другое число перерабатывает пару целых чисел (одно из них — делимое, а другое, не равное нулю, — делитель). Результатом применения алгоритма к этой паре чисел является третье число — частное. Уже в силу применимости алгоритма к разным объектам, разным элементам некоторого множества, он обязательно должен содержать в себе не только постоянные, но и переменные параметры.

Однако в программе не все параметры переменные. Некоторые параметры в ней постоянны, что имеет определенный смысл, так как это, ограничивая возможности программы, ограничивает и цель исследования — сужает или упрощает задачу исследования, поскольку каждый постоянный параметр имеет лишь единственное значение.

Подобное упрощение делается по разным причинам.

Во-первых, в силу недостаточной изученности объекта исследования другие возможные значения фиксированного параметра могут быть неизвестными и неясными. Так, например, при моделировании мелодий массовых песен программой предусматривается диатонический (семиступенчатый) звукоряд без использования хроматизмов — изменений диатонической ступени лада на полтона \*). Ведь использование в музыкальных композициях так называемых «случайных» знаков (диезов, bemolей) на самом деле не случайно — они подчинены определенной логике развития музыкального сочинения, а она до сих пор изучена весьма слабо.

---

\* ) Повышение ступени на полтона обозначается знаком  $\sharp$  (диез), а понижение на полтона — знаком  $\flat$  (бемоль).

Во-вторых, сознательное упрощение некоторых сторон моделируемого объекта позволяет обратить большее внимание на другие, более интересные для исследователя стороны этого объекта и глубже их изучить. Так, в алгоритме, синтезирующем музыкальные объекты, длина мелодии часто бывает постоянной, равной восьми тактам.

Кроме того, отдельные стороны или закономерности объекта исследования часто непринципиальны для поставленной задачи. Так, для упрощения алгоритма рассматриваются не все возможные мажорные тональности, а лишь одна — До мажор; аналогично, из всех минорных тональностей рассматривается лишь параллельная — ля минор.

Выбор постоянных параметров в программе вполне оправдан, поскольку они отражают постоянные, типичные черты исследуемого объекта. Кроме того, значительно сокращаются усилия при программировании, что позволяет сосредоточить внимание на более существенных сторонах исследования.

Любой постоянный параметр можно, несколько изменив программу, сделать переменным, но тогда программа становится более сложной. Это объясняется тем, что один и тот же параметр используется в разных частях программы и обычно бывает связан с другими параметрами.

Переменные параметры значительно увеличивают возможности программы. Они позволяют по одной и той же программе реализовать различные типы объектов (при синтезировании некоторой модели или при решении, например, вычислительных или игровых задач), которые определяются разными наборами значений этих переменных параметров. При моделировании музыкальных объектов они дают возможность исследовать существенность тех или иных закономерностей композиций разных типов, установить определенные логические, смысловые и ассоциативные связи между некоторым понятием (типов композиции) высокого уровня определений и элементарными понятиями для данной программы — моделировать низший уровень определения понятий. Короче говоря, переменные параметры делают программу более гибкой.

Кроме постоянных и переменных параметров, отражающих закономерности и средства композиции, алгоритм включает в себя так называемые *случайные параметры*.

Случайные параметры — высота ноты, ее длительность, интервал — это элементарные понятия, наименьшие частицы в системе, порождающей музыкальные сочинения. Каждый из них принимает по нескольку предусмотренных в алгоритме значений. Каждое такое значение выбирается, как уже отмечалось выше, с помощью генератора случайных чисел с использованием соответствующего способа кодирования. Выбор значений этих параметров на самом деле является не совсем случайным — он подчинен

определенным закономерностям и каждый раз происходит в соответствии с неким вероятностным распределением, которое в свою очередь определяется значением того или другого постоянного или переменного параметра, и с условиями, заложенными в исходные данные и соответствующими конкретным целям моделирования.

Случайные параметры сами по себе не определяют типа композиции и не влияют на него; они лишь приводят к реализации разных вариантов в пределах одного и того же типа композиции (при одном и том же фиксированном наборе значений переменных параметров, соответствующем этому типу композиции). Поэтому роль случайных параметров в алгоритме существенно отличается от роли постоянных или переменных параметров. Можно представить себе программу, в которой нет переменных параметров. Для этого надо для каждого переменного параметра выбрать одно из его значений и зафиксировать его в программе. Такая программа будет синтезировать, например, лишь какой-то один тип композиции. Однако программа, моделируя эвристическую деятельность, в частности сочинение музыки, не может работать без случайных параметров; именно они определяют разнообразие вариантов внутри типа композиции, способствуют тому, что по одной и той же программе (даже в пределах одного и того же типа) может быть получено практически бесчисленное множество различных композиций. В некотором смысле случайные параметры вместе с генератором случайных чисел имитируют фантазию композитора, который в муках творчества ищет разные варианты композиций — разные мелодические или ритмические фигуры и их сочетания в рамках одного и того же типа композиций.

### § 4.3. Иерархический принцип строения алгоритма

*Параметры. Значения параметра. Существенные параметры. Тип объекта. Формальное соответствие между типом объекта и набором существенных значений параметров. Формирование программы набором существенных значений параметров. Имитационное моделирование.*

Способ организации алгоритма основан на принципе иерархичности уровней определения различных понятий.

Любая музыкальная композиция характеризуется как в синтаксическом, так и в семантическом отношении некоторым набором параметров, отражающих правила, закономерности и элементы строения и развития музыкального сочинения, а также средства композиции. Параметрами могут быть диапазон мелодии, тип масштабно-тематической структуры, тактовый размер, количество нот затакта, лад, распределение частот некоторого элемента композиции, например интервала или длительности, оп-

ределенная совокупность значений некоторой характеристики, например типа аккордов, фактуры вариации и др.

Под значением параметра понимается, скажем, определенное конкретное значение числового кода, конкретный закон распределения частот интервала, набор аккордов, определенная мелодическая или ритмическая фигура и т. д.

Приведем примеры некоторых значений параметров.

*Звуковысотный диапазон*, определенный неравенством вида

$$15 \leq W \leq 26. \quad (4.2)$$

Здесь старший разряд (1 или 2) представляет собой номер октавы, а младший — номер основной ступени звукоряда в октаве. Так, 5 — код ноты *соль*, а 6 — ноты *ля*. Соотношением (4.2) устанавливается диапазон от ноты *соль* первой октавы до ноты *ля* второй.

*Масштабная структура*, заданная соотношением

$$\dot{S}_N = 2 + 2 + 1 + 1 + 2.$$

Эта запись показывает, что выбранный восьмитактовый период разбивается на двутактовые фразы и однотактовые мотивы. Первые две фразы образуют четырехтактовое предложение.

*Тактовый размер*: 4/4.

*Количество нот затакта*: 2.

*Лад*: мажор.

Приведенный набор параметров характерен для мелодии песни И. Дунаевского «Молодежная» (см. рис. 3.7), однако, как будет показано ниже, те же комбинации параметров могут встречаться и в других мелодиях, ибо значения параметров не полностью определяют конкретную мелодию.

Значением параметра может быть и распределение частот интервалов, заданное матрицей вида

$$\begin{pmatrix} 2 & 3 & 1 \\ 1/2 & 1/4 & 1/4 \end{pmatrix},$$

где в первой строке указаны значения интервалов: *терция* (2), *кварта* (3) и *секунда* (1), а во второй — их частоты. В этом примере квarta и секунда выбираются примерно с одной частотой, а *терция* — с вдвое большей.

Под типом композиции понимается определенный признак, особенность или качество музыки, присущие некоторой совокупности композиций (стиль, жанр, эмоциональная направленность и т. п.). Типом может быть танцевальная музыка, вальс, вальс Штрауса, широта, напевность, вариационность и т. п.

Если рассмотреть совокупность композиций какого-нибудь типа, то не все параметры будут его характеризовать в одинаковой мере. Один параметр в подавляющем большинстве композиций будет принимать лишь одно определенное значение. Такие

параметры будем называть *существенными*. Если же параметр не является существенным, т. е. в разных композициях этого типа принимает различные значения, то его будем называть *несущественным*.

Примером существенного параметра в танцевальной музыке будет «тактовый размер», который для вальса имеет существенное значение  $3/4$ , для чарльстона —  $4/4$ . Примером несущественного параметра для вальса служит количество нот затаакта. Для русской народной песни существенным значением параметра «секвенция» является значение «отсутствие секвенции», поскольку секвенция нехарактерна для мелодий русских народных протяжных песен. Существенным значением параметра «допустимый набор аккордов» при гармонизации главными трезвучиями будет такой набор, который состоит из трезвучий тоники, субдоминанты и доминанты в основном виде (без обращений аккордов). Для певучей, напевной мелодии существенно значение параметра «закон распределения частот интервалов» — такое распределение интервалов, в котором малые интервалы, обеспечивающие поступенное, плавное движение (секунда, прима), встречаются значительно чаще, чем интервалы широкие (например, сексты, квинты).

Таким образом, существенные значения параметров — необходимые признаки композиций этого типа.

Рассмотрим теперь способ, положенный в основу организации описываемых алгоритмов.

Пусть

$$M = M(p_1, p_2, \dots, p_k, \dots)$$

— упорядоченный набор всевозможных параметров  $p_k$ . Для каждого параметра  $p_k$  задано определенное множество

$$(p_{k1}, p_{k2}, \dots, p_{ke}, \dots)$$

значений этого параметра.

Моделирование типа композиции основано на предположении, что любой тип (признак)  $T_c$  композиций характеризуется определенным набором значений параметров

$$M_c = M(p_{1a_c}, p_{2b_c}, \dots, p_{ke_c}, \dots),$$

где  $p_{ke_c}$  — определенное значение параметра  $p_k$  из множества допустимых, причем, если параметр  $p_k$  несуществен для типа  $T_c$ , то на его месте в наборе  $M_c$  стоит специальный символ  $N$  — признак несущественного параметра.

Это означает, что для всех композиций одного и того же типа  $T_c$  каждый существенный параметр фиксирован — он принимает только одно (существенное для данного типа) значение, указанное в наборе  $M_c$ . Параметр же, несущественный для типа

$T_c$  (отмеченный в наборе  $M_c$  символом  $N$ ), может принимать для разных композиций этого типа различные значения из множества допустимых.

При таком способе соответствия каждому типу  $T_c$  композиции отвечает некоторая типовая структура, определенная набором  $M_c$  существенных значений параметров.

Таким образом, качественной, или субъективной, характеристике композиции (тип  $T_c$ ) ставится в соответствие формально-количественная, или объективная, характеристика (набор значений параметров  $M_c$ ).

Набор значений параметров представляет собой перечень закономерностей и средств композиции. Для каждого параметра в этом наборе указано лишь одно из множества предусмотренных для него значений.

Покажем теперь, как этот набор значений параметров  $M_c$  связан с программой, моделирующей определенный тип  $T_c$  композиции. Программа, синтезирующая музыкальные композиции, включает в себя определенное множество параметров. Некоторые из них постоянны и принимают лишь по одному фиксированному значению. Например, параметр «длина периода» в программе принимает лишь одно значение — восемь тактов; число масштабных структур равно четырем; длина каждого построения (мотивы, фразы или предложения) кратна длине одного такта (т. е. трем четвертям в тактовом размере  $3/4$  и четырем четвертям в тактовом размере  $4/4$ ); число ступеней в октаве равно семи, что допускает получение лишь диатонических (семиступенных) композиций и т. п.

Другие параметры, предусмотренные в программе, переменны и принимают по нескольку значений. Набор  $M$  представляет собой перечень этих переменных параметров. Набор  $M_c$  — это перечень закономерностей (фиксированных значений переменных параметров), предусмотренных в программе. Так как в наборе  $M_c$  для каждого параметра указано лишь одно его значение, он характеризует лишь некоторое подмножество из всего множества закономерностей и средств композиций, предусмотренных в программе.

Составленный заранее (до начала работы программы) набор  $M_c$  во время работы программы автоматически засыпается в определенные ячейки машинной памяти и таким образом формируется конкретная программа. Формирование программы аналогично описанному выше формированию стандартной программы для решения системы  $n$  уравнений с  $m$  неизвестными, где оно осуществлялось засыпкой двух фиксированных значений  $n$  и  $m$ . Отличие рассматриваемой программы заключается лишь в большем числе засыпаемых значений, часть которых представляет собой не просто числа, а определенные числовые структуры или вычислительные процедуры.

Если значение какого-либо параметра не было задано заранее набором  $M_c$ , то оно выбирается либо случайным образом с помощью генератора случайных чисел, либо в зависимости от значений других параметров.

Таким образом, в процессе синтезирования композиции каждый раз участвуют не все запрограммированные закономерности и средства композиции, а лишь их некоторая часть, указанная в наборе  $M_c$ . Благодаря этому в одной и той же программе можно по-разному выбирать подмножества закономерностей (наборы  $M_c$ ), т. е. разные закономерности и средства композиций, из числа предусмотренных в программе. Каждому выбранному набору  $M_c$  соответствует определенный тип композиций  $T_c$ . Таким образом, одну и ту же программу можно использовать для синтеза музыкальных композиций разных типов.

Вместе с синтезированной композицией при выполнении программы печатается набор значений параметров  $M_c$ , использованных для формирования программы синтезирования, включая и те значения параметров, которые не задавались заранее, а были выбраны во время работы программы. В отличие от первоначально заданного — начального набора  $M_c$ , набор, которым формируется программа, будем называть *рабочим набором*. Рабочий набор характеризует структуру полученной композиции. Это позволяет установить формальное соответствие между типом синтезированной композиции (качественным понятием) и набором  $M_c$  — ее структурой.

#### § 4.4. Особенности метода моделирования музыкальных композиций

*Переход количества в качество. Принципиальные возможности метода. Моделирование низшего иерархического уровня определений. Восстановление механизма порождения объекта. Метод анализа — синтеза.*

Результаты программирования с набором  $M_c$ , который отвечает типу  $T_c$ , служат иллюстрацией того, как количество (набор значений параметров) переходит в качество (тип музыки). Любое изменение набора  $M_c$ , т. е. подмножества закономерностей и средств композиции, участвующих в синтезировании композиции, сразу же отражается на типовых особенностях синтезируемых композиций.

Наличие генератора случайных чисел, участвующего в выборе различных параметров, позволяет по одной и той же программе и даже при одном и том же фиксированном наборе  $M_c$  синтезировать ряд различных музыкальных композиций.

Композиции разных типов  $T_c$ , вообще говоря, вызывают у слушателей и разные эмоциональные состояния. Моделирование ставит в соответствие каждому определенному типу композиции

отвечающий ему набор  $M_c$ , т. е. формальное описание структуры этого типа, что принципиально позволяет решить важную проблему искусствоведения и психологии восприятия — найти зависимость между структурой музыки и ее воздействием на эмоциональное состояние слушателя.

Такое моделирование исследуемого объекта представляет собой по существу моделирование низшего уровня определения понятий, соответствующих данному объекту (см. § 2.5). Это следует из необходимости формализации и точного алгоритмического описания каждого понятия, а также установления его связей с другими понятиями, стоящими в иерархическом ряду на более низкой ступени, которые в конечном счете определяются через элементарные понятия. Отсюда следует, что практически каждое понятие, используемое при анализе объекта исследования, можно выразить посредством цепочки ассоциативных связей через элементарные понятия.

Таким образом, при моделировании на электронной вычислительной машине каждое понятие высокого уровня определений сводится к низшему уровню.

Элементарные понятия вводятся в программу с самого начала, их содержание и синтаксический смысл определены формально и однозначно и, следовательно, не требуют дальнейших уточнений. Примерами элементарных понятий служат такие понятия, как основная ступень звукоряда (*до, ре, ми, ...*), длительность

(, ..., тактовый размер (3/4, 4/4), интервал (прима, секунда, терция, кварта, ...), частота появления определенного интервала или длительности в нотном тексте, число тактов мелодического построения и т. п.

На основе этих элементарных понятий формируются понятия, синтаксически более сложные,— ритмическая или мелодическая группа, мелодическая структура, высотный диапазон мелодии, аккорд и т. п.

Как было показано в § 4.3, тип объекта, например тип музыкальной композиции, является понятием довольно высокого уровня определений. Это понятие качественное и, вообще говоря, не имеет точных определений. Разные лица могут в одно и то же понятие из-за нечеткости представления о нем вкладывать разный смысл, разное содержание.

Имитационное моделирование позволяет путем введения различных комбинаций значений параметров в набор  $M_c$  так «настроить» программу, что будет получено точное (в пределах возможности программы) определение понятия *тип композиции*  $T_c$ . Содержание этого понятия соответствует представлениям о нем тех лиц, которые участвуют в гипотетическом эксперименте по установлению адекватности объекта и его модели.

Покажем это на примере содержания такого качественного понятия, как напевная мелодия. Интуитивно мы все представляем себе, какой должна быть напевная мелодия, хотя вряд ли сможем дать ее точное определение. Для этого надо выявить формальные признаки понятия, установить формальные связи его с элементарными понятиями. Последнее выполняется автоматически при рассмотрении машинных напевных мелодий, так как вместе с мелодией (в соответствии с описанным методом моделирования) печатается и перечень ее характеристик — набор  $M_c$ .

Но машина не может группировать или отбирать мелодии по их качественным признакам — это привилегия человека с его способностью к восприятию и оценке объекта на интуитивном уровне. Поэтому необходим эксперимент, в основе которого лежит сочетание возможностей и способностей человека и машины. Опишем его. Перед некоторой группой слушателей проигрываются, скажем, 100 мелодий, сочиненных машиной. Каждую из них слушатели должны отнести либо к напевной, либо к пепнапевной. Способ отбора может быть различным; он уточняется при проведении и обработке результатов эксперимента. Так, отбирать нужные мелодии можно или простым голосованием, или при статистической обработке протоколов эксперимента, на которых каждый слушатель единолично характеризует и группирует прослушиваемые мелодии, или каким-нибудь другим способом.

В результате прослушивания выделяются все мелодии, отнесенные к напевным. Все они характеризуются перечнем их признаков и особенностей — набором  $M_c$ .

Анализируя эти наборы  $M_c$ , состоящие, вообще говоря, из разных значений параметров, устанавливается, что некоторые параметры имеют одни и те же значения для всех напевных мелодий (или для их абсолютного большинства). Заметим, что здесь возможны отклонения от «среднестатистических» показателей, вызванные нестандартностью мнений и оценок слушателей-экспертов, участвующих в эксперименте, так как при отборе мелодий они руководствуются не формальными критериями, а качественно-интуитивными представлениями, которые могут обладать большим разбросом. Выделяя совпадающие значения параметров, общие для всех мелодий, получим искомое подмножество существенных значений, признаков, характерных для напевных мелодий.

Таким образом устанавливаются связи понятия «напевная мелодия» с элементарными понятиями и получается точное определение этого понятия через понятия элементарные, причем понятие высокого уровня автоматически выражается с помощью понятий низшего уровня.

Следует отметить, что эти рассуждения справедливы лишь для достаточно мощной программы с большим набором введен-

ных правил, закономерностей и средств композиции. Поэтому правильнее говорить о множестве существенных признаков напевной мелодии, определяемых возможностями данной программы.

Описанный способ выявления формальных признаков, основанный на моделировании, не дает гарантии их полноты. Наше «точное» определение понятия может оказаться неполным: вполне возможно, что может быть найден дополнительный признак напевности, не обнаруженный в эксперименте. Это может иметь место не только в силу недостаточной мощности программы, в которой данный признак не был предусмотрен в качестве элементарного понятия, но и в силу того, что представления об этом понятии слушателей-экспертов, выбирающих напевные мелодии, основаны на интуитивных соображениях, которые в разных социомузикальных группах могут оказаться различными, нечеткими, или размытыми.

Вводя для проверки полученный набор существенных значений в качестве начального набора  $M_c$ , можно восстановить механизм порождения композиций типа напевных мелодий, и если в результате работы программы будут получены именно они, то это полностью или частично подтверждает правильность полученных предположений о структуре мелодий такого типа.

Так раскрывается содержание сложных понятий путем моделирования на вычислительной машине. По-видимому, в принципе — в самых общих чертах — такая схема рассуждений пригодна для раскрытия содержания и других понятий достаточно высокого уровня, не относящихся к музыке.

Заметим, что различные группы экспертов характеризуются, вообще говоря, не всегда совпадающими тезаурусами (см., например, Г. Г. Воробьев, 1973) и поэтому даже интуитивные представления их о каком-либо понятии или объекте могут не только различаться, но и часто выражаться с помощью отличающихся элементарных понятий. Поэтому описанный выше эксперимент по анализу результатов моделирования следует проводить для относительно однородных равнотезаурусных групп экспертов. Каждой из таких групп будет соответствовать свой набор  $M_c$ , характеризующий представление об исследуемом объекте именно этой группы экспертов. Анализ сходства и различия наборов, полученных для разных групп, позволяет установить степень универсальности изучаемого объекта (понятия), а также дает возможность получить исходную информацию для изучения особенностей восприятия у различных социodemографических групп. Здесь мы видим побочный результат имитационного моделирования мелодий, который может оказаться полезным для социологических исследований по восприятию музыки.

Анализ эстетического объекта и его восприятия связан с определенными структурными признаками этого объекта. Во многих случаях сложность структуры не позволяет провести полный

и прямой объективный анализ объекта и выявить закономерности его восприятия. Моделирование позволяет имитировать объект, получить его модель, и для нее сразу же выделить существенные параметры.

Обозначим через  $P(O)$  объект исследования, подлежащий моделированию, а через  $P(M_c)$  — результат его моделирования, полученный по программе, сформированной набором  $M_c$ .

Как показано выше, при этом моделировании устанавливается соответствие между типом  $T_c$  музыкальной композиции  $P(M_c)$  и набором значений параметров  $M_c$ . Для достаточно мощной программы можно так подобрать набор  $M_c$ , что композиция  $P(M_c)$  будет либо довольно точно имитировать композицию  $P(O)$  некоторого класса, либо просто совпадать с ней, как в примере с мелодией песни «Молодежная» (см. ниже § 5.4). Поэтому вместо анализа объекта  $P(O)$  с неизвестными характеристиками можно анализировать объект  $P(M_c)$ , закономерности и структура которого известны. При этом формальный анализ данного исследуемого объекта заменяется формальным анализом синтезированного объекта  $P(M_c)$ . Такой анализ — синтез, или анализ на основе синтеза, обладает рядом существенных достоинств. Во-первых, если рассматривать композиции одного и того же уровня синтаксической сложности, построение программы для анализа музыки, вводимой в машину извне, принципиально сложнее построения программы для синтеза. Во-вторых, с точки зрения объективности группирования композиций по типам или отбора композиций некоторого типа целесообразнее брать для анализа композиции, сочиненные не человеком, а машиной, поскольку при этом исключаются как влияние ассоциаций, связанных со знакомыми мелодиями, так и трудность сочинения или подбора для анализа большого числа в определенном смысле однотипных композиций.

Особенно целесообразно применение метода анализа — синтеза при анализе тех объектов  $P(O)$ , параметры которых по каким-либо причинам выявить трудно (единичные произведения и т. п.). Метод анализа — синтеза был применен нами при исследовании мелодий определенного класса (мелодии массовых песен), полученных при варьировании заданных мелодий (см. ниже § 5.4).

В экспериментах А. А. Володина по синтезу музыкальных звуков применяется метод анализа — синтеза при физическом моделировании тембров классических музыкальных инструментов на электромузикальном инструменте — синтезаторе «Экводин» (А. А. Володин, 1970). Конструкция «Экводина» позволяет изменять значения различных акустических параметров, что приводит к изменению тембра синтезированного звука. При получении определенного тембра соответствующие ему значения параметров, как и в нашем случае, становятся известными экспериментатору.

## § 4.5. Постановка (конкретизация) цели

*Цель и ограничение области действий. Уточнение цели. Выбор машиной ограничительных условий. Постановка цели машиной — имитация деятельности композитора.*

Рассмотрим некоторые аспекты проблемы постановки цели. Одним из свойств цели является определенное ограничение области действий, или ограничение деятельности, которое осуществляется наложением дополнительных условий, содержащихся в формулировке цели. Таким образом, сама постановка, или формулировка, цели содержит условия, ограничивающие область действий, или сферу деятельности.

Применительно к рассматриваемому синтезу мелодий это означает не отбрасывание некоторых уже готовых вариантов синтезированного объекта, а ограничение (своебразное уменьшение степеней свободы) области синтезирования типом объекта, например, «напевные мелодии» с заданным ритмом ограниченного звуковысотного диапазона, являющиеся вариациями только одной заданной мелодии.

Человек в своей творческой деятельности не всегда сознательно использует различного рода оговорки, уточняющие постановку цели; они подразумеваются и учитываются неосознанно. Для машины же эти оговорки, или дополнительные, уточняющие условия, необходимы, чтобы избежать возможных недоразумений из-за буквального понимания цели машиной.

Выше было показано (§ 4.3), что каждое из значений  $r_{he_c}$  набора  $M_c$  либо задается программистом заранее, до начала работы программы, либо выбирается машиной из множества допустимых для данной программы значений параметра  $r_h$ .

Можно считать, что во втором случае программа сама формирует условия, уточняющие цель ее действий, т. е. формирует подцели для синтеза композиции. Таким образом, здесь реализуется постановка некоторой подцели машиной. Для нашего алгоритма такой подцелью является сочинение музыки определенного типа  $T_c$ , который характеризуется набором значений существенных параметров  $M_c$  и отличается качественными особенностями, а не просто сочинением какой-либо музыки, доступной данной программе.

Таким образом, выбирая значения  $r_{he_c}$  для набора  $M_c$ , машина «ставит цель» — сочинить композицию некоторого определенного типа  $T_c$ , соответствующего выбранному набору значений параметров  $M_c$ .

Выбор значений  $r_{he_c}$  машиной может быть осуществлен двумя способами.

Случайным образом — посредством генератора случайных чисел, когда значения  $r_{he_c}$  выбираются из всех возможных значе-

ний параметра  $p_k$ . Целенаправленно, когда значения  $p_{ke_c}$  выбираются из некоторой части всех возможных значений параметра  $p_k$ , определяемой дополнительными условиями. Эти условия получаются в результате машинного анализа некоторых заранее введенных в программу элементов, что в свою очередь ограничивает класс синтезируемых объектов или, что то же, выбор значений  $p_{ke_c}$ . Такими элементами могут быть стихи при синтезировании песенных мелодий (стихотворный ритм влияет на песенный ритм; Р. Х. Зарипов, 1971а) или мелодия — тема  $K_0$  при сочинении музыкальных вариаций \*).

Подобно тому, как машина, ставя перед собой цель, ограничивает область своей деятельности, композитор не просто пишет музыку. Перед ним каждый раз стоит вполне определенная, конкретная задача, определенная цель, которая значительно ограничивает выбор используемых выразительных средств и музыкальных форм из всех возможных в музыке. Ведь любое музыкальное произведение — это не какая-то смесь разностильных композиционных приемов или мешаница из случайно подобранных последовательностей звуков. Оно подчиняется своим законам строения. Каждому произведению соответствует своя логика развития, свои выразительные и композиционные средства, своя музыкальная форма, или структура.

Все эти правила и законы выработаны художественной практикой или сконструированы вопреки ей — и в том, и в другом случае они предоставляют композитору лишь малую долю всех возможностей музыки. Любопытно, что композитор об этом обстоятельстве, по-видимому, мало заботится — он просто сочиняет определенное музыкальное произведение, не осознавая тех ограничений, которые накладывает на его деятельность стиль композиции. В самом деле, предположим, что композитору надо сочинить песню на заданные стихи. Цель вполне определенная: сочинить мелодию на заданный стихотворный ритм, а не на стихотворение как таковое, т. е. мелодию определенной ритмической фактуры; при этом мелодия должна быть облечена в строго определенную традиционную музыкальную форму — это куплетная форма, или музыкальный период, состоящий, как правило, из восьми или шестнадцати тактов; звуковысотный диапазон мелодии достаточно узок — приблизительно полторы октавы. Же-

\*). Заметим, что в точности такая же ситуация имеет место в процессе целеполагания у человека. Имея некоторую глобальную цель, либо предопределенную генетически, либо поставленную большей системой, например обществом, человек разбивает ее на подцели. Такое разбиение осуществляется или случайно, на этапе «свободного» поиска, или путем формирования ограничений, полученных в результате предварительного анализа. И в том и в другом случае исходные ограничения задаются извне, а в процессе творческой деятельности осуществляется лишь их индивидуальная конкретизация и декомпозиция (разбиение на части — подцели). (Прим. ред.)

лательно при этом, чтобы музыка отражала в какой-то степени и внутреннее содержание стихотворения, но это условие слишком неопределенно, и его можно интерпретировать по-разному. Поэтому оно несущественно, тем более что часто оно просто невыполнимо: ведь в песне все куплеты поются на одну и ту же мелодию, которая не меняется, в то время как содержание каждого куплета песни может менять свой характер (например, от бравурного в начале песни до трагического в конце).

Разумеется, каждый из перечисленных параметров характеризуется многими степенями свободы, для него возможен большой выбор различных вариантов: так, один и тот же стихотворный ритм может соответствовать многим различным песенным ритмам или ритмам мелодии, для каждого из которых можно сочинить большое количество различных мелодических линий.

И все же ограничения в используемых музыкальных средствах здесь огромные.

Если же нужно сочинить песню массовую, предназначенную в первую очередь для исполнителя и слушателя, не искушенных в музыке, то она должна удовлетворять еще дополнительным условиям массовости и доходчивости, которые в свою очередь накладывают дополнительные ограничения на ритмику и звуковысотную линию песни \*).

Так, в массовой песне совершенно исключаются атональность в ее разных видах (додекафония, алеаторика и т. д.), трудные для массового исполнителя мелодические обороты, сложные ритмические фигуры, допустимые в других видах вокальной музыки, например в романсах и вокализах, предназначенных для профессионального исполнения (см. ниже гл. 7).

Таким образом, композитор каждый раз сочиняет музыку определенного типа — конкретной формы, жанра, объема, диапазона и т. п.— пьесу для виолончели, мелодию на заданные стихи, романс или детскую песню. В любом случае все это ограничивает деятельность композитора в области сочинения музыки при выборе им музыкальных средств. Кроме того, уже в рамках этого типа композиций формируются заранее, часто неосознанно, и другие ограничения. Все они выражаются как бы в уточнении поставленной цели, или в постановке уточненной цели, или в более корректной ее постановке.

---

\*.) О некоторых «секретах доходчивости» мелодики массовой песни см., например, книгу В. И. Зака (1979).

## ГЛАВА 5

## СОЧИНЕНИЕ МЕЛОДИЧЕСКИХ ВАРИАЦИЙ НА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ МАШИНЕ

## § 5.1. Элементы мелодии и их кодирование

*Длительность ноты. Расстояние ноты. Основные ступени звукоряда. Высота ноты. Тактовый размер (метр). Способы кодирования нотного текста. Координатная метрическая сетка. Представление нотного текста в рабочем виде. Интервал. Операция сложения и вычитания.*

Перейдем теперь к более подробному рассмотрению принципов и деталей кодирования элементов мелодии, используемых в нашей программе.

Мелодия (тема  $K_o$  или вариация  $K_v$ ) представляет собой музыкальное сочинение в форме восьмитактового периода в натуральном мажоре или гармоническом миноре (сведения о строении мелодии, ее сторонах и элементах см. в § 3.4, а также в Словаре музыкальных терминов).

*Длительности нот* определяют относительную продолжительность звучания нот и кодируются следующим образом:

$$\mathfrak{N}_{-1}, \mathfrak{N}_{-2}, \mathfrak{N}_{-3}, \mathfrak{N}_{-4}, \dots, \quad (5.4)$$

т. е. значение кода  $\sigma$  ноты соответствующей длительности пропорционально продолжительности ее звучания. Наименьшая допустимая в программе длительность — шестнадцатая ( $\sigma = 1$ ).

В алгоритме предусмотрен выбор различных сочетаний длительностей  $\sigma^*$ , состоящих из одной или нескольких упорядоченных длительностей. Продолжительность звучания, или длина  $L\sigma^*$  каждого сочетания  $\sigma^*$ , кратна продолжительности звучания длительности  $\downarrow$  (четверть), которая принимается за единицу длительности.

*Элементарным сочетанием длительностей* будем называть такое сочетание длительностей  $\sigma^*$ , которое обладает следующими свойствами: длина его  $L\sigma^*$  кратна длине четверти; оно или включает в себя хотя бы одну длительность, меньшую четверти ( $\sigma < 4$ ), или состоит из одной длительности, кратной четверти; оно не является последовательностью элементарных сочетаний длительностей меньшей длины.

Элементарными сочетаниями длительностей, например, являются следующие сочетания:

♩; ♪; ♩ ♩; ♩ ♩; ♩; ♩. ♩; ♩; ♩ ; ♩ ; ♩ ; ♩. и др.

## Сочетания длительностей



не элементарны, поскольку они не удовлетворяют хотя бы одному из перечисленных выше условий.

*Расстояние*  $\Sigma$  ноты от начала мелодии вводится для определения места ноты в тексте.

В соответствии с определением сочетания длительностей расстояние ноты определяется целым числом, равным сумме длительностей всех нот того элементарного сочетания длительностей, в которое входит рассматриваемая нота, и всех нот, предшествующих этому элементарному сочетанию. Таким образом, определяется расстояние от начала мелодии сразу всего элементарного сочетания длительностей, в которое входит рассматриваемая нота. Расстояние ноты измеряется в четвертях и отсчитывается от конца самого первого затаакта мелодии, расстояние которого полагается равным нулю.

Номер основной ступени звукоряда  $\omega$  и номер октавы  $\theta$  кодируются целыми числами ( $\omega = 1$  — до,  $2$  — ре,  $3$  — ми,  $4$  — фа,  $5$  — соль,  $6$  — ля,  $7$  — си;  $\theta = 0$  — малая октава,  $1$  — первая и т. д.).

Высота звука  $W$  определяется номером октавы  $\theta$  и основной ступенью звукоряда  $\omega$  и представляется двузначным позиционным числом:

$$W = \theta\omega. \quad (5.2)$$

Нота мелодии представляется в виде

$$\Sigma\theta\omega\xi, \quad (5.3)$$

где  $\xi$  — код знака альтерации ( $\xi = 0$  — бекар,  $4$  — диеz,  $2$  — бемоль).

*Тактовый размер*, или *метр*  $t$ , вводится для организации музыкального ритма. В программе используются два размера —  $3/4$  и  $4/4$ , которые кодируются следующим образом:

$$\frac{3}{4} - t = 3, \quad \frac{4}{4} - t = 4. \quad (5.4)$$

В программе используются два способа кодирования нотного текста: *понотный* и *потактовый*. Каждый из них применяется на разных этапах преобразования мелодии.

Понотный способ заключается в том, что мелодия записывается в виде последовательности нот, представленных соотношением (5.3). Он удобен при тех преобразованиях, в которых первоначальное количество нот не меняется: между данными нота-

ми не вклиниваются другие ноты, и отдельные ноты не удаляются (например, изменение тактового размера, знаковая секвенция, изменение лада или длительностей нот и др.).

Потактовый способ предусматривает запись каждого такта мелодии в виде матрицы  $\|W_{kj}\|$ , состоящей в зависимости от метра из трех или четырех колонок — по числу  $t$  долей в такте. Здесь  $j$  ( $j = 1, 2, \dots, t$ ;  $t = 3$  или  $4$ ) — номер столбца (четверти в такте);  $k$  ( $k = 1, 2, 3, 4$ ) — номер строки (шестнадцатой в четверти).

Таким образом, каждый такт мелодии записывается в виде таблицы:

для тактового размера  $3/4$  ( $t = 3$ ).

$$\|W_{kj}\| = \begin{vmatrix} W_{11} & W_{12} & W_{13} \\ W_{21} & W_{22} & W_{23} \\ W_{31} & W_{32} & W_{33} \\ W_{41} & W_{42} & W_{43} \end{vmatrix};$$

для тактового размера  $4/4$  ( $t = 4$ )

$$\|W_{kj}\| = \begin{vmatrix} W_{11} & W_{12} & W_{13} & W_{14} \\ W_{21} & W_{22} & W_{23} & W_{24} \\ W_{31} & W_{32} & W_{33} & W_{34} \\ W_{41} & W_{42} & W_{43} & W_{44} \end{vmatrix}$$

Здесь  $W_{kj} \neq 0$  — высота  $W$  звука  $k$ -й четверти  $j$ -й доли такта;  $W_{kj} = 0$  означает, что  $(k + 4(j - 1))$ -я шестнадцатая в такте залигована с предыдущей, т. е. на нее продлено звучание предыдущей шестнадцатой. Каждый звук продолжается до ближайшей шестнадцатой с ненулевым значением  $W_{kj}$ . Порядок следования — слева вниз и направо, что схематически показано на рис. 5.1.

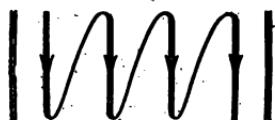


Рис. 5.1. Порядок следования нот при кодировании одного такта нотного текста в виде матрицы высот (потактовый способ кодирования).

При кодировании длительностей и ритма без указания высот вместо значения  $W$  записывается *признак начала длительности*.

Потактовое кодирование нотного текста представляет собой наглядную запись одного такта мелодии. Оно удобно при преобразованиях, когда происходит изменение первоначального количества нот (заполнение интервала между двумя данными нотами дополнительными нотами и т. п.).

При потактовом кодировании для представления ноты добавляется еще одна координата  $i$ , указывающая номер такта в ме-

лодии ( $i = 0, 1, \dots, 8$ ). В нулевом такте помещается затакт композиции (при отсутствии затакта его длина считается равной нулю). Таким образом, местоположение каждой ноты в мелодии однозначно определяется значением  $W_{ikj}$ . При этом определяется ее высота  $W$ , начало и конец длительности, а также ее положение в мелодии (значения  $i, j, k$ ).

Для иллюстрации запишем потактовым способом первые пять тактов, включая затакт, мелодии песни И. Дунаевского «Молодежная», приведенной на рис. 3.7:

15	21	21	21	17	22	17	15	15	24	24	24	23	25	23	21	21
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	21	21	21	21	0	0	-0.15	-0.15	24	24	24	24	0	0	0	0.21
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

По нотным кодированием тот же отрывок записывается в виде следующей последовательности чисел:

$\Sigma \sigma W$	$\Sigma \sigma W$	$\Sigma \sigma W$	$\Sigma \sigma W$
00 2 15	03 2 21	08 2 15	12 2 23
00 2 15	04 2 17	09 2 24	12 2 24
01 2 21	04 2 21	09 2 24	13 4 25
01 2 21	05 4 22	10 2 24	14 4 23
02 2 21	06 4 17	10 2 24	15 4 21
02 2 21	07 4 15	11 2 24	16 2 21
03 2 21	08 2 15	11 2 24	16 2 21

В принятой системе кодирования тройка чисел  $i, k, j$  ( $i = 0, 1, \dots, 8; k = 1, 2, 3, 4; j = 1, 2, 3$  (или 4)) образует координатную метрическую сетку, на которую накладывается мелодия — ее ритм и высоты  $W$ . Шаг дискретности сетки равен длительности шестнадцатой. В соответствии с нотной записью или графическим представлением мелодической линии ритм можно рассматривать как двумерный объект с координатами  $i, n$ , где  $n$  ( $n = 1, 2, \dots, 4t$ ) — номер узла сетки в такте. Зависимость между  $n, k, j$  выражается формулой  $n = k + 4(j - 1)$ .



Рис. 5.2. Графическое представление ритма мелодии «По Дону гуляет...» (см. рис. 5.3), наложенного на координатную метрическую сетку тактового размера 3/4.

Наглядное представление о координатной метрической сетке, а также о ритме мелодии, вписанном в эту сетку, можно получить из их графического изображения.

Ритм мелодии, представляющий собой упорядоченную последовательность длительностей нот, можно графически изобразить в виде последовательности отрезков прямой, пропорциональных этим длительностям. Координата  $t$  на оси времени принимает

дискретные значения. Примем шаг дискретности равным длительности шестнадцатой. Таким образом, на метрическую сетку, изображенную на графике рис. 5.2, накладывается определенный ритм. Тонкие черточки под осью  $m$  (узлы сетки) отделяют соседние шестнадцатые ( $m$  — номер шестнадцатой, или номер узла сетки), а пунктирные вертикальные линии над осью показывают положение тактовых черт. На рис. 5.2 изображена метрическая сетка для тактового размера  $3/4$ ; на нее наложен ритм мелодии песни «По Дону гуляет...» (жирные вертикальные черточки), нотная запись которой приведена на рис. 5.3.



Рис. 5.3. Нотная запись мелодии песни «По Дону гуляет...».

График ритма представляет собой последовательность отрезков прямых с различными пропорциональными значениями длительностей. Две соседние длительности отделены вертикальной чертой.

На рис. 5.4 приведена графическая запись мелодии песни «По Дону гуляет...» с указанием высот и длительностей ее нот. Здесь горизонталь — ось времени,  $0W$  — ось высоты. Ордината пропорциональна высоте ноты.

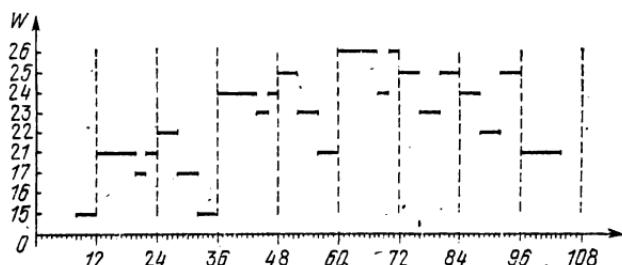


Рис. 5.4. Графическое представление мелодии (ритма и звуковысотной линии) «По Дону гуляет...», наложенной на координатную метрическую сетку.

Поясним теперь более подробно на примерах систему кодирования (нумерации) элементов графика ритма (см. рис. 5.2). На рис. 5.5 изображен в увеличенном масштабе фрагмент этого графика для размера  $3/4$ , т. е. для случая, когда каждый такт содержит 12 шестнадцатых. Здесь  $m$  — номер шестнадцатой, отсчитываемый от начала нулевого такта, в котором помещается затакт;  $m$ -я шестнадцатая заключена между  $(m-1)$ -м и  $m$ -м узлами метрической сетки, поэтому номер шестнадцатой совпадает с координатой (узлом) ее конца.

Из рисунка видно, что началом  $l$ -го такта является его начальный узел, или координата начала первой шестнадцатой этого

го такта с номером  $m_l = 12l$  или, в общем случае,

$$m_l = 4tl,$$

где  $t$  — код тактового размера. Этот же узел служит концом  $(l-1)$ -го такта.

Соответственно, конец  $l$ -го такта определяется моментом окончания последней шестнадцатой в такте:

$$m_{l+1} = 4t(l+1) = m_l + 4t.$$

Началу некоторой  $j$ -й ноты, расположенной в метрической сетке, соответствует начало первой ее шестнадцатой, а концу

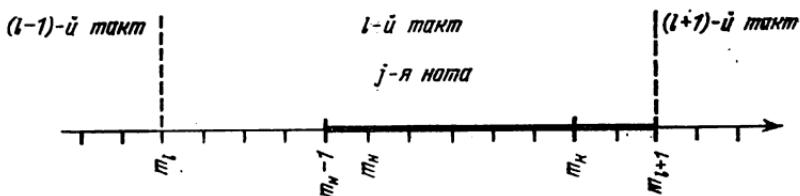


Рис. 5.5. График расположения длительностей нот в координатной метрической сетке тактового размера 3/4.

ноты — конец ее последней шестнадцатой. Таким образом, обозначая номер первой шестнадцатой в ноте через  $m_n$ , а номер последней — через  $m_k$ , получаем значение длины, или продолжительности  $j$ -й ноты  $L_j$ :

$$L_j = m_k - (m_n - 1) = m_k - m_n + 1.$$

Наибольшее значение координаты конца последней ноты мелодии  $m_k'$  определяется так. В нашем случае допустимыми тактовыми размерами являются 3/4 и 4/4, что соответствует значениям  $t=3$  и  $t=4$ . Из структуры мелодии (восьмитактовый период) следует, что координата конца последней ноты

$$m_k' = 9 \cdot 4t - L_{\sigma_{\text{зат}}},$$

где 9 — количество всех тактов метрической сетки, включая и нулевой; 4 — число шестнадцатых в четверти;  $t$  — значение тактового размера;  $L_{\sigma_{\text{зат}}}$  — длина затачка. При нулевом затачке и при  $t=4$  координата  $m_k'$  конца последней ноты мелодии приобретает наибольшее значение, равное  $9 \cdot 4 \cdot 4 = 144$ . При  $t=3$  значение  $m_k' = 9 \cdot 4 \cdot 3 = 108$ .

В ряде случаев метрическую сетку оказывается удобным представлять в матричной форме, в виде матрицы  $\|C_{kj}^i\|$ , где  $C_{kj}^i$  — элемент  $i$ -й матрицы, находящийся на пересечении  $k$ -й строки и  $j$ -го столбца. Здесь  $i$  — номер такта ( $i=0, 1, \dots, 8$ );  $j$  — номер четверти в такте ( $j=1, 2, \dots, t$ );  $k$  — номер шестнадцатой в четверти ( $k=1, 2, 3, 4$ );  $t$  равно 3 или 4 в зависимости от тактового размера.

При записи одномерной метрической сетки в матричной форме все узлы этой сетки нумеруются подряд, как на рис. 5.2. Тогда  $m = 1, 2, \dots, 9 \cdot 4t$ .

Для иллюстрации запишем в виде матриц  $\|C_{kj}^i\|$  координаты узлов одномерной метрической сетки нулевого, первого и восьмого тактов. Элемент  $\|C_{kj}^i\|$ , находящийся в  $i$ -й матрице на пересечении  $k$ -й строки и  $j$ -й колонки, равен значению  $m$ :

$$C_{kj}^i = m,$$

где  $m = 4ti + 4(j-1) + k$ ;  $t = 3$  или  $4$ ;  $i = 0, 1, \dots, 8$ ;  $j = 1, 2, \dots, t$ ;  $k = 1, 2, 3, 4$ .

Эти матрицы приведены в табл. 5.1 для двух тактовых размеров  $3/4$  (верхний ряд) и  $4/4$  (нижний ряд). Следует обратить внимание на то, что в табл. 5.1, а также в следующих табл. 5.2

Таблица 5.1

1	5	9	13	17	21		97	101	105			
2	6	10	14	18	22		98	102	106			
3	7	11	15	19	23	...	99	103	107			
4	8	12	16	20	24		100	104	108			
1	5	9	13	17	21	25	29	129	133	137	141	
2	6	10	14	18	22	26	30	130	134	138	142	
3	7	11	15	19	23	27	31	...	131	135	139	143
4	8	12	16	20	24	28	32		132	136	140	144

и 5.3 записаны лишь координаты узлов метрической сетки и не закодированы высоты и длительности звуков мелодии.

В некоторых случаях метрическую сетку удобнее представлять так, чтобы в каждом такте все узлы сетки нумеровались одинаково — подобно записи в виде нот. Тогда нужно дополнительно указывать номер такта. В этом случае метрическая сетка кодируется в двумерном виде с координатами  $i$  и  $n$ . Здесь  $i$  — номер такта,  $i = 0, 1, \dots, 8$ ;  $n$  — номер шестнадцатой, или номер узла в каждом такте,  $n = 1, 2, \dots, 4t$ .

Таблица 5.2

01	05	09	11	15	19		81	85	89			
02	06	010	12	16	110		82	86	810			
03	07	011	13	17	111	...	83	87	811			
04	08	012	14	18	112		84	88	812			
01	05	09	013	11	15	19	113	81	85	89	813	
02	06	010	014	12	16	110	114	...	82	86	810	814
03	07	011	015	13	17	111	115	83	87	811	815	
04	08	012	016	14	18	112	116	84	88	812	816	

В табл. 5.2 приведены матрицы  $\|C_{kj}^i\|$  координат узлов двумерной метрической сетки. Здесь элемент  $C_{kj}^i$ , находящийся в

*i*-й матрице на пересечении *k*-й строки и *j*-й колонки, содержит значения (*i*, *n*):

$$C_{kj}^i = (i, n),$$

где *n* = 4(*j* - 1) + *k*; *i* = 0, 1, ..., 8; *j* = 1, 2, ..., *t*; *t* = 3 или 4; *k* = 1, 2, 3, 4.

Как и в табл. 5.1, здесь представлены нулевой, первый и восьмой такты для тактовых размеров 3/4 (верхний ряд) и 4/4 (нижний ряд).

Т а б л и ц а 5.3

011 021 031	111 121 131	811 821 831
012 022 032	112 122 132	812 822 832
013 023 033	113 123 133	813 823 833
014 024 034	114 124 134	814 824 834
011 021 031 041	111 121 131 141	811 821 831 841
012 022 032 042	112 122 132 142	812 822 832 842
013 023 033 043	113 123 133 143	813 823 833 843
014 024 034 044	114 124 134 144	814 824 834 844

Иногда удобнее представлять мелодию или ритм в трехмерной метрической сетке. В табл. 5.3 приведены матрицы  $\|C_{kj}^i\|$  координат узлов такой трехмерной сетки. Здесь элемент  $C_{kj}^i$ , находящийся в *i*-й матрице на пересечении *k*-й строки и *j*-й колонки, представляет собой тройку чисел (*i*, *j*, *k*):

$$C_{kj}^i = (i, j, k),$$

где *i* — номер такта, *i* = 0, 1, ..., 8; *j* — номер четверти в такте, *j* = 1, 2, ..., *t*; *k* — номер шестнадцатой в четверти, *k* = 1, 2, 3, 4. Как и в табл. 5.1, 5.2, здесь приведены нулевой, первый и восьмой такты для двух тактовых размеров: 3/4 (верхний ряд) и 4/4 (нижний ряд).

Потактовое кодирование мелодии, описанное выше, предусматривает лишь фиксацию начала каждой ноты, так как в определенном узле метрической координатной сетки записывается значение высоты *W*. Кодирование длительности сводится к тому, что в последующих узлах метрической сетки до начала следующей ноты записываются нули, показывающие, что на эти узлы сетки (шестнадцатые) продлевается звучание указанной ранее высоты *W*. Однако при некоторых преобразованиях мелодии надо знать высоту ноты в каждый момент времени, т. е. в каждом узле метрической сетки, на которую наложены ритм и звуко-высотная линия. Для этого используется способ кодирования мелодии в виде *непрерывной линии* высот с указанной дискретностью, подобно графическому представлению мелодической линии, помещаемой в той же метрической сетке. При этом во всех узлах метрической сетки, на которые продлевается звучание высоты *W*, вместо нулей записывается значение *W*. Таким образом, во всех узлах метрической сетки, на которую наложена

мелодия, помещаются значения высоты, отличные от нуля, а вся мелодия оказывается записанной потактовым способом одними шестнадцатыми.

При некоторых преобразованиях мелодии нужно знать не только значение высоты в каждый момент времени, но и координаты начала каждой ноты. Для этого в том узле метрической сетки, где начинается нота, помещается признак начала (знак 9 в третьей позиции).

Такое представление мелодии будем называть *рабочим видом*. Ниже на рис. 5.10 в нотной записи представлены мелодии русской народной песни «По Дону гуляет...» (строка 1) и ее рабочий вид (строка 2).

Запишем в виде примера четыре такта этой мелодии, включая затакт, в рабочем виде, потактно кодируя нотный текст:

0 0 915	921 21 917	922 917 915	924 24 923
0 0 15	21 21 17	22 17 15	24 24 23
0 0 15	21 21 921	22 17 15	24 24 924
0 0 15	21 21 21	22 17 15	24 24 24

*Интервал*  $\varphi$  между высотами двух нот  $W_1$  и  $W_2$  определяется количеством ступеней между ними. Интервалы кодируются следующим образом:

$\varphi = 0$  — *прима*, 1 — *секунда*, 2 — *терция*, 3 — *кварта*, 4 — *квинта*, 5 — *секста*, 6 — *септима*, 7 — *октава* и т. д.

Значение интервала  $\varphi$  вычисляется по формуле

$$\varphi = W_2 \ominus W_1, \quad (5.5)$$

где  $\ominus$  — символ операции вычитания (см. ниже), а знак интервала + или — указывает движение высоты ноты  $W_2$  вверх или вниз относительно  $W_1$ . Соответственно сумма высоты  $W_1$  и интервала  $\varphi$  образует высоту  $W_2$ :

$$W_2 = W_1 \oplus \varphi, \quad (5.6)$$

где  $\oplus$  — символ операции сложения.

Операции сложения  $\oplus$  и вычитания  $\ominus$  высот и интервалов несколько отличаются от обычных операций сложения и вычитания чисел в десятичной или иной системе счисления, что обусловлено принятой в работе системой кодирования.

В алгоритме используются семь основных ступеней (диатонического) звукоряда, расположенных одна за другой в разных октавах. Следовательно, наиболее удобной системой счисления, в которой бы их следовало кодировать и производить над ними различные действия, является семиричная. Однако вычисления приходится делать (приспособливаясь к машине или алгоритмическим языкам) в восьмеричной или десятичной системе. При этом одна или несколько цифр исключаются из рассмотрения. При всевозможных действиях над интервалами и высотами нот

в алгоритме несоответствие между числом основных ступеней звукоряда и системой счисления, в которой производятся вычисления, компенсируется путем введения специальной функции. Благодаря этому вычисление по формулам (5.5) и (5.6) сводится к вычислению по обычным, общепринятым формулам сложения и вычитания чисел.

Для наглядности определим операции сложения  $\oplus$  и вычитания  $\ominus$  высот  $W_1$ ,  $W_2$  и интервалов  $\varphi$ , связанных формулами (5.5) и (5.6), с помощью табл. 5.4 с двумя входами —  $W_1$  и  $\varphi$ .

Таблица 5.4

$W_1$	$\varphi$																		
	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
16	05	06	07	11	12	13	14	15	16	17	21	22	23	24	25	26	27	31	32
17	06	07	11	12	13	14	15	16	17	21	22	23	24	25	26	27	31	32	33
21	07	11	12	13	14	15	16	17	21	22	23	24	25	26	27	31	32	33	34
22	11	12	13	14	15	16	17	21	22	23	24	25	26	27	31	32	33	34	35
23	12	13	14	15	16	17	21	22	23	24	25	26	27	31	32	33	34	35	36
24	13	14	15	16	17	21	22	23	24	25	26	27	31	32	33	34	35	36	37
25	14	15	16	17	21	22	23	24	25	26	27	31	32	33	34	35	36	37	41
26	15	16	17	21	22	23	24	25	26	27	31	32	33	34	35	36	37	41	42
27	16	17	21	22	23	24	25	26	27	31	32	33	34	35	36	37	41	42	43
31	17	21	22	23	24	25	26	27	31	32	33	34	35	36	37	41	42	43	44
32	21	22	23	24	25	26	27	31	32	33	34	35	36	37	41	42	43	44	45
33	22	23	24	25	26	27	31	32	33	34	35	36	37	41	42	43	44	45	46
34	23	24	25	26	27	31	32	33	34	35	36	37	41	42	43	44	45	46	47
35	24	25	26	27	31	32	33	34	35	36	37	41	42	43	44	45	46	47	51
36	25	26	27	31	32	33	34	35	36	37	41	42	43	44	45	46	47	51	
37	26	27	31	32	33	34	35	36	37	41	42	43	44	45	46	47	51		
41	27	31	32	33	34	35	36	37	41	42	43	44	45	46	47	51			

Здесь высоты  $W_1$  и  $W_2$  представлены в соответствии с (5.2) двузначным числом в виде  $\theta\omega$ :  $W_1 = \theta_1\omega_1$ ,  $W_2 = \theta_2\omega_2$ . На пересечении  $W_1$ -й строки и  $\varphi$ -й колонки табл. 5.4 расположено соответствующее им значение  $W_2$ .

Отсюда способ нахождения искомого результата по формуле  $W_2 = W_1 \oplus \varphi$  очевиден. Так, для заданных значений  $W_1 = 26$  и  $\varphi = 3$  получаем  $W_2 = W_1 \oplus \varphi = 26 \oplus 3 = 32$ .

Вычисление интервала  $\varphi$  по формуле  $\varphi = W_2 \ominus W_1$  покажем на следующем примере для заданных значений  $W_1$  и  $W_2$ . Пусть  $W_2 = 32$ ,  $W_1 = 26$ . Ищем в таблице точку пересечения диагонали с заданным значением  $W_2$  ( $W_2 = 32$ ) и  $W_1$ -й строки ( $W_1 = 26$ ). Эта точка пересечения находится в колонке с номером  $\varphi = 3$ , который и служит искомым значением.

Из структуры этой таблицы ясен принцип ее расширения в сторону увеличения или уменьшения приведенных в ней значений  $W_1$ ,  $W_2$  и  $\varphi$ .

Определим теперь операции сложения  $\oplus$  и вычитания  $\ominus$  аналитически в виде формул, которые используются в программе.

Для этого рассмотрим сначала некоторые понятия из теории чисел, к которым относятся целая часть числа и сравнение по целому модулю.

*Целой частью*  $x$  называется целочисленная функция от вещественной переменной  $x$ , обозначаемая  $[x]$ , или  $E(x)$ . Эта функция определяется для всех вещественных  $x$  и представляет собой наибольшее целое, не превосходящее  $x$ , т. е.  $[x] \leq x < [x] + 1$ . Таким образом, на числовой оси  $x$  ( $-\infty < x < \infty$ ) значение  $[x]$  всегда располагается не правее точки  $x$ , т. е.  $[x] \leq x$  и равенство настуپает при целом  $x$ .

Примеры:  $[3, 2] = 3$ ,  $[2] = 2$ ,  $[0] = 0$ ,  $[-2, 7] = -3$ .

*Сравнение по модулю*  $m$ . Рассмотрим остатки от деления целых чисел на фиксированное положительное целое  $m$ , называемое *модулем*. Всякое целое  $a$  представляется при этом единственным способом в виде

$$a = mq + b, \quad 0 \leq b < m, \quad (5.7)$$

где  $q$  — частное,  $b$  — остаток от деления  $a$  на  $m$ .

Примеры. Пусть  $m = 7$ . Имеем

$$\begin{aligned} 19 &= 7 \cdot 2 + 5, & 0 < 5 < 7; \\ -20 &= 7 \cdot (-3) + 1, & 0 < 1 < 7; \\ 21 &= 7 \cdot 3 + 0, & 0 = 0 < 7. \end{aligned}$$

Таким образом, каждому целому  $a$  соответствует определенный остаток  $b$ , полученный в результате деления  $a$  на  $m$ . Принято говорить, что  $a$  сравнимо с  $b$  по модулю  $m$ , и записывать это в виде

$$a \equiv b \pmod{m}.$$

Рассмотрим теперь множество  $C$  двузначных десятичных позиционных чисел вида  $ab$  ( $a = 0, 1, \dots, 9$ ;  $b = 0, 1, \dots, 9$ ) и разобьем его на два подмножества:  $\{W\}$ , где  $W = ab$  при  $a = 0, 1, \dots, 9$  и  $b = 1, 2, \dots, 7$ , и  $\{\bar{W}\}$ , где  $\bar{W} = ab$  при  $a = 0, 1, \dots, 9$  и  $b = 8, 9, 0$ .

Поставим в соответствие элементам  $W$  множества  $\{W\}$  белые клавиши рояля так, как показано на рис. 5.6. Из рисунка видно, что элементы  $W$  множества  $\{W\}$  являются кодами высот соответствующих нот, введенных ранее (см. (5.2)), где  $W = \theta\omega$ . Их семиступенные последовательности чередуются со значениями  $\bar{W}$  множества  $\{\bar{W}\}$ , не являющимися кодами высоты и, следовательно, не имеющими никакого отношения к музыкальным символам.

Введенная выше операция сложения  $\oplus$  должна отражать связи между номерами (кодами) из упорядоченной последовательности  $\{W\}$ . Покажем, как свести ее к обычным операциям с десятичными числами.

Результатом прибавления к высоте  $W_1$  интервала  $\varphi$  служит высота  $W_2$ , отстоящая от  $W_1$  на  $\varphi$  ступеней:

$$W_2 = W_1 \oplus \varphi.$$

Как видно из рис. 5.6, значения  $\bar{W}$  при этом не учитываются — они просто исключаются из рассмотрения как не имеющие музыкального смысла.

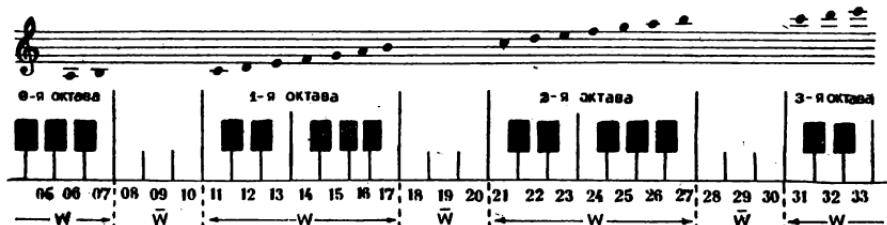


Рис. 5.6. Соответствие белых клавиш рояля высотам нот на нотоносце и числовым кодам.

При обычном же сложении двух чисел — кода высоты  $W_1$  и кода интервала  $\varphi$  — получается число  $W_1 + \varphi$ , вообще говоря, отличное от числа  $W_2$  на некоторое количество  $d$  единиц, так как сложение  $W_1 + \varphi$  учитывает значения  $\bar{W}$ . Отсюда

$$W_2 = W_1 \oplus \varphi = W_1 + \varphi + d. \quad (5.8)$$

Для получения значения кода  $W_2$  по известным  $W_1$  и  $\varphi$  нужно свести операцию сложения  $\oplus$  к обычному сложению чисел в десятичной или иной системе счисления по формуле (5.8).

Перейдем к определению  $d$ . Введем следующие обозначения:

$$f = |\varphi| - 7 \left[ \frac{|\varphi|}{7} \right], \text{ или } |\varphi| \equiv f \pmod{7};$$

отсюда  $f = 0, 1, \dots, 6$ , т. е. величина  $f$  меньше интервала октавы; назовем  $f \operatorname{sign} \varphi$  основным интервалом;

$B = \omega_1 + f \operatorname{sign} \varphi$ ; так как  $1 \leq \omega \leq 7$  (см. (5.2)) и  $-6 \leq f \operatorname{sign} \varphi \leq 6$ , то

$$-5 \leq \omega_1 - f \leq \omega_1 + f \operatorname{sign} \varphi \leq \omega_1 + f \leq 13. \quad (5.9)$$

$A = \left[ \frac{B-1}{7} \right]$ ; для нашего случая (5.9) имеем:

$$A = \begin{cases} 1, & \text{если } B \geq 8 \quad (B-1 \geq 7); \\ 0, & \text{если } 1 \leq B \leq 7 \quad (0 \leq B-1 < 7); \\ -1, & \text{если } B \leq 0 \quad (B-1 < 0). \end{cases}$$

На рис. 5.6 видно, что  $W_2 = W_1 \oplus \varphi = W_1 + \varphi$  и, следовательно,  $d = 0$  в том и только в том случае, если  $W_1 + \varphi$  не выходит

за пределы того отрезка значений  $\{W\}$ , в котором расположено значение  $W_2$ , т. е. если высоты с кодами  $W_2$  и  $W_1$  расположены в октаве с одним и тем же номером ( $\theta_2 = \theta_1$ ).

Это равносильно тому, что

$$1 \leq \omega_1 + \varphi \leq 7. \quad (5.10)$$

В противном случае, если

$$\omega_1 + \varphi < 1 \text{ или } \omega_1 + \varphi > 7, \quad (5.11)$$

добавочный член  $d$  отличен от нуля. Это объясняется тем, что каждый раз, когда происходит переход интервала  $\varphi$ , прибавленного к высоте  $W_1$ , через отрезок  $\{\bar{W}\}$  (т. е. переход из одной октавы в другую), к сумме  $W_1 + \varphi$  добавляется число 3 (со знаком числа  $\operatorname{sign} \varphi$ ), равное количеству чисел  $\bar{W}$ , расположенных между двумя последовательностями чисел  $W$  множества  $\{W\}$ , кодирующих высоты (или клавиши, см. рис. 5.6) соседних октав.

Это число равно разности  $p - 7$ , где  $p$  — основание системы счисления, в которой производятся вычисления (в нашем случае  $p = 10$  и  $p - 7 = 3$ ). Отсюда очевидно обобщение на системы счисления с любым основанием  $p$  ( $p > 7$ ).

Условие (5.11) выполняется, если

$$\text{а) } \omega_1 + f \operatorname{sign} \varphi \leq 0 \text{ или } \omega_1 + f \operatorname{sign} \varphi \geq 8,$$

а также если

б)  $|\varphi| \geq 7$ , т. е. интервал  $\varphi$  не является основным интервалом, а содержит в себе целое число октав.

При выполнении как условия а), так и условия б) происходит прибавление числа 3. Поэтому член  $d$  состоит из двух слагаемых:

$$d = 3A + 3 \left[ \frac{|\varphi|}{7} \right] \operatorname{sign} \varphi.$$

Очевидно, что при невыполнении условий а) и б)  $d = 0$ .

Таким образом,

$$W_2 = W_1 \oplus \varphi = W_1 + \varphi + 3 \left( A + \left[ \frac{|\varphi|}{7} \right] \operatorname{sign} \varphi \right), \quad (5.12)$$

или

$$W_2 = W_1 \oplus \varphi = W_1 + \varphi + 3 \left( \left[ \frac{\omega_1 + f \operatorname{sign} \varphi - 1}{7} \right] + \left[ \frac{|\varphi|}{7} \right] \operatorname{sign} \varphi \right).$$

Рассмотрим несколько примеров.

Пример 1. Пусть  $W_1 = 26$ ,  $\varphi = 3$ . Найти  $W_2 = 26 \oplus 3$ . Определим последовательно  $f$ ,  $B$  и  $A$ :  $f = 3$ ,  $B = 6 + 3 = 9$ ,  $A = \left[ \frac{9 - 1}{7} \right] = 1$ . Подставляя найденные значения в формулу (5.12), получаем  $W_2 = 26 \oplus 3 = 26 + 3 + 3 \left( 1 + \left[ \frac{3}{7} \right] \cdot 1 \right) = 32$ .

**Пример 2.**  $W_1 = 17$ ,  $\varphi = -3$ . Найти  $W_2 = 17 \oplus (-3)$ .  $f = 3$ ,  $B = 7 + 3(-1) = 4$ ,  $A = 0$ .  $W_2 = 17 \oplus (-3) = 17 - 3 + 3(0 + + \left[ \frac{3}{7} \right](-1)) = 14$ .

**Пример 3.**  $W_1 = 13$ ,  $\varphi = -5$ . Найти  $W_2 = 13 \oplus (-5)$ .  $f = 5$ ,  $B = 3 + 5(-1) = -2$ ,  $A = \left[ \frac{-2 - 1}{7} \right] = -1$ ,  $W_2 = 13 \oplus (-5) = 13 - -5 + 3 \left( -1 + \left[ \frac{5}{7} \right](-1) \right) = 13 - 5 - 3 = 5$ .

**Пример 4.**  $W_1 = 21$ ,  $\varphi = -9$ . Найти  $W_2 = 21 \oplus (-9)$ .  $f = 2$ ,  $B = 1 + 2(-1) = -1$ ,  $A = \left[ \frac{-1 - 1}{7} \right] = -1$ .  $W_2 = 21 \oplus (-9) = 21 - -9 + 3 \left( -1 + \left[ \frac{9}{7} \right](-1) \right) = 21 - 9 + 3(-2) = 6$ .

Рассуждая аналогично, сведем операцию вычитания  $\ominus$  (см. (5.5)) при определении интервала  $\varphi$  к обычным вычислениям. Имеем

$$\varphi = W_2 \ominus W_1 = W_2 - W_1 - 3(\theta_2 - \theta_1), \quad (5.13)$$

где  $\theta_1$  и  $\theta_2$  — номера октав, а  $W_1$  и  $W_2$  — высоты рассматриваемых нот.

**Пример 5.** Пусть  $W_2 = 15$ ,  $W_1 = 13$ . Найти  $\varphi = 15 \ominus 13$ . Так как здесь  $W_2 = \theta_2 \omega_2 = 15$ ,  $W_1 = \theta_1 \omega_1 = 13$ , то получаем по формуле (5.13):  $\varphi = 15 \ominus 13 = 15 - 13 - 3(1 - 1) = 2$ .

**Пример 6.**  $W_2 = 21$ ,  $W_1 = 17$ . Найти  $\varphi = 21 \ominus 17$ .  $\varphi = 21 \ominus 17 = 21 - 17 - 3(2 - 1) = 1$ .

**Пример 7.**  $W_2 = 17$ ,  $W_1 = 21$ . Найти  $\varphi = 17 \ominus 21$ .  $\varphi = 17 \ominus 21 = 17 - 21 - 3(1 - 2) = -4 - 3(-1) = -1$ .

## § 5.2. Основные принципы варьирования мелодии. Элементарные преобразования

*Преобразование метра. Формирование ритма. Выбор стержневых нот. Вертикальный перенос инвариантов мелодической линии. Заполнение интервала между инвариантными высотами.*

Как было показано в § 3.4, преобразование темы  $K_0$  в вариацию  $K_v$  сводится к трем основным операциям: переносу инвариантов  $I_0$  из  $K_0$  в  $K_v$ , изменению элементов  $T_v$  и формированию в  $K_v$  констант  $C_v$ . Рассмотрим некоторые из предусмотренных в алгоритме элементарных преобразований и принципов варьирования мелодии, реализующих эти операции. Изложение иллюстрируется результатами промежуточных этапов преобразования мелодии «По Дону гуляет...» в мелодию песни И. Дунаевского «Молодежная» (см. ниже рис. 5.10). Это преобразование (варьирование) исходной мелодии выполнено с помощью электронной

вычислительной машины БЭСМ-6 в соответствии с описываемым ниже алгоритмом.

*Преобразование метра, или метропреобразование*, заключается в том, что каждый такт метрической сетки размера  $t_p$  преобразуется в такт сетки размера  $t_v$  искомой вариации ( $t_v \neq t_p$ ). В результате такого преобразования у мелодии изменяется тактовый размер и метр (порядок чередования равных по длительности долей такта), но сохраняются метроритмические акценты (соотношение сильных и слабых долей в ритме) и количество тактов. В целом же ритм как упорядоченная последовательность определенных длительностей изменяется.

Преобразование изменяет длину тех или иных долей такта: одни сокращаются, другие остаются неизменными, а третьи растягиваются. Это вызвано тем, что при преобразовании метра  $3/4$  в  $4/4$  три четверти первого метра должны растянуться на четыре четверти второго, а при преобразовании метра  $4/4$  в  $3/4$  четыре четверти свертываются в три четверти. На рис. 5.7 схематически показаны три варианта соотношения долей одного такта для тактовых размеров  $3/4$  и  $4/4$ .

Эти же варианты в нотной записи представлены на рис. 5.8 (для  $3/4$ ) и 5.9 (для  $4/4$ ). Из рисунков видно, как в зависимости от варианта изменяются длительности, находящиеся в тех или других долях такта и расположенные на рисунках на одной вертикали.

Так, для 1-го варианта длительности первой четверти тактового размера  $3/4$ , растянутые на 1-ю и 2-ю четверти размера  $4/4$ , будут увеличены в два раза; длительности же, расположенные во 2-й и 3-й четвертях размера  $3/4$ , останутся неизменными в 3-й и 4-й четвертях размера  $4/4$ .

При преобразовании четырехдольного метра в трехдольный четыре четверти первого метра свертываются в три четверти второго метра. Для 2-го варианта длительности, расположенные во 2-й и 3-й четвертях размера  $4/4$ , уменьшаются в два раза, свернувшись во 2-ю четверть размера  $3/4$ , а длительности 1-й и 4-й четвертей, перейдя соответственно в 1-ю и 3-ю четверти размера  $3/4$ , останутся неизменными.

Таким образом, номер  $s$  ( $s = 1, 2, 3$ ) варианта преобразования метра совпадает с номером той четверти такта в размере  $3/4$ , которая растягивается на три четверти ( $s$  и  $s+1$ ) размера  $4/4$  при преобразовании трехдольного метра в четырехдольный метр.

При преобразовании тактового размера  $4/4$  и размер  $3/4$   $s$  — это номер четверти размера  $3/4$ , в которую свертываются две четверти ( $s$ -я и  $(s+1)$ -я) размера  $4/4$ .

*Преобразование метрических сеток при изменении метра.* Покажем теперь, как преобразуются координатные метрические сетки при переводе одного метра в другой, используя схемы соответствия (см. рис. 5.7—5.9). Частично это уже сделано на

рис. 5.8 и 5.9, где все узлы (шестнадцатые) перенумерованы и тем самым показан переход узлов сетки такта одного метра в узлы другой метрической сетки. В табл. 5.5 и 5.6 записано это соответствие в принятом выше (см. табл. 5.2) виде для представ-

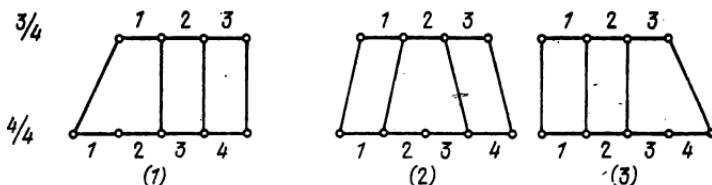


Рис. 5.7. Три варианта соответствия долей такта при преобразовании метра.



Рис. 5.8. Три варианта соответствия узлов координатных метрических сеток одного такта при преобразовании трехдольного метра в четырехдольный.



Рис. 5.9. Три варианта соответствия узлов координатных метрических сеток одного такта при преобразовании четырехдольного метра в трехдольный.

ления двумерных метрических сеток. В этих таблицах для краткости опущен номер такта, поскольку речь идет о преобразовании одного произвольного такта.

Табл. 5.5 показывает, как координаты узлов метрической сетки (номера шестнадцатых в такте) одного такта метра 3/4 соответствуют узлам координатной метрической сетки метра 4/4. В правой части таблицы — в соответствующих узлах координатной сетки метра 4/4 — помещены номера узлов координатной сетки метра 3/4.

Т а б л и ц а 5.5

Метр	3/4				4/4							
Варианты				1				2				3
Четверти	1	2	3		1	2	3	4	1	2	3	4
Координаты узлов метрической сетки	1	5	9		1	3	5	9	1	5	7	9
	2	6	10		1	3	6	10	2	5	7	10
	3	7	11		2	4	7	11	3	6	8	11
	4	8	12		2	4	8	12	4	6	8	12

На табл. 5.6 показан переход номеров координатных узлов одного такта метра 4/4 на координатную сетку (на места соответствующих узлов) тактового размера 3/4. Вследствие сжатия двух четвертей метра 4/4 до одной четверти метра 3/4 при таком преобразовании происходит потеря четырех шестнадцатых. Так, во 2-м варианте во 2-й четверти исчезли номера 6, 8, 10, 12, в 1-м — 2, 4, 6, 8 и в 3-м — 10, 12, 14, 16.

Т а б л и ц а 5.6

Метр	4/4				3/4									
Варианты				1				2				3		
Четверти	1	2	3	4	1	2	3		1	2	3	4		
Координаты узлов метрической сетки	1	5	9	13	1	9	13		1	5	13	1	5	9
	2	6	10	14	3	10	14		2	7	14	2	6	11
	3	7	11	15	5	11	15		3	9	15	3	7	13
	4	8	12	16	7	12	16		4	11	16	4	8	15

*Структура метропреобразования.* В алгоритме предусмотрен общий случай преобразования метра мелодии, когда разные такты этой мелодии могут преобразовываться в соответствии с разными вариантами, приведенными в табл. 5.5 и 5.6. Такое преобразование метра мелодии определяется структурой метропреобразования, задаваемой в виде

$$S_{mp} = s_0 s_1 \dots s_i \dots s_s, \quad (5.14)$$

где  $i$  — номер такта,  $s$  — номер варианта преобразования метра одного такта ( $s = 1, 2, 3$ ).

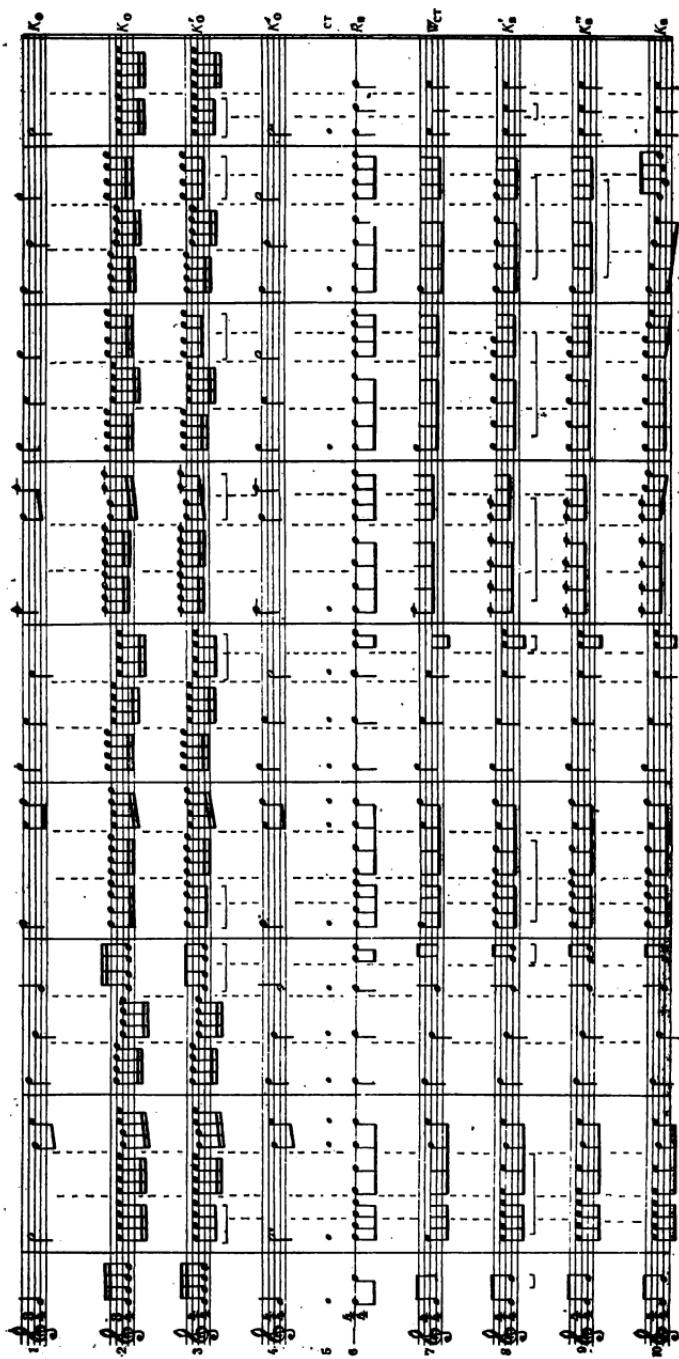


Рис. 5.10. Промежуточные этапы машинного преобразования темы — мелодии русской народной песни «По Дону гул...» в вариацию — мелодию песни И. Дунаевского «Молодежная».

Поскольку фиксированный ритм наложен на сетку определенного метра, то при метропреобразовании деформируется и ритм: одни длительности остаются неизменными, а другие делаются короче или длиннее. Для преобразования метра мелодия представляется в рабочем виде.

В строке 3 рис. 5.10 показан результат преобразования метрической сетки размера  $3/4$  (строка 2) в сетку размера  $4/4$ . В этом случае структура имеет вид

$$S_{mp} = 1\ 1313\ 3331.$$

Скобками отмечены деформированные доли такта. Вертикальные пунктирные линии отделяют соседние четвертные доли такта. В строке 4 рис. 5.10 в размере  $4/4$  записана мелодия  $K_0'$ , полученная в результате метропреобразования исходной темы  $K_0$  размера  $3/4$ .

*Формирование ритма.* Ритм  $R_b$  искомой вариации  $K_b$  формируется одним из трех способов, предусмотренных алгоритмом:

а)  $R_b$  совпадает с ритмом  $R_0$  темы при  $t_b = t_0$ . В этом случае варьирование мелодии  $K_0$  сводится к преобразованию звуковысотной линии.

б)  $R_b$  получается в результате деформации ритма  $R_0$ , например, посредством метропреобразования.

в)  $R_b$  представляет собой готовый ритм, введенный извне в закодированном виде. На рис. 5.10 в строке 6 показан ритм  $R_b$ , введенный таким образом.

*Выбор стержневых нот* и присвоение им признака СТ (СТ — от слова Стержневая) производятся для последующего переноса инвариантов звуковысотной линии мелодии  $K_0$  на ритм  $R_b$ . Предусмотрены различные принципы выбора СТ-нот, например:

а) СТ-ноты либо мелодии  $K_0$ , либо ритма  $R_b$ . Самая первая и самая последняя ноты  $R_b$  всегда отмечаются признаком СТ.

б) СТ — сильная, первая нота каждого такта; первая нота каждой доли такта; ноты, образующие последовательность «затакт — сильная доля»; ноты первых  $p$  четвертей такта ( $p < t$ ).

При получении одной и той же вариации СТ-ноты могут выбираться в разных частях мелодии разными способами. Так, в строке 5 рис. 5.10 показаны СТ, присвоенные нотам мелодии  $K_0$ : в первых тактах ( $i = 0, 1, 2, 3, 4$ ) признаком СТ отмечены все ноты  $K_0$ , а в каждом из остальных тактов — лишь первая нота.

*Вертикальный перенос инвариантов мелодической линии темы  $K_0$  в вариацию  $K_b$*  — основной этап варьирования. К этому этапу  $K_b$  представлена своим ритмом  $R_b$ , а тема  $K_0$  приведена к рабочему виду, вообще говоря, метропреобразована и имеет вид  $K_0'$ . Кроме того, по определенному принципу в  $K_0$  или  $R_b$  выбраны стержневые ноты.

Под вертикальным переносом понимается следующая операция, схематически изображенная на рис. 5.11. Пусть  $K'_0$  — непрерывная мелодическая линия темы (см. § 5.1),  $n_0$  — координата начала некоторой длительности ритма  $R_b$ . На  $K'_0$  вследствие ее непрерывности любой точке  $n_0$  отвечает определенная высота  $W_0$ . Вертикальный перенос заключается в том, что некоторой длительности ритма  $R_b$  с координатой начала  $n_0$  присваивается высота  $W_0$  из  $K'_0$ , имеющая ту же координату.

Рассмотрим способы вертикального переноса, реализуемые алгоритмом в зависимости от принципа выбора стержневых нот.

а) Признак СТ присвоен нотам ритма  $R_b$ . В этом случае для каждой длительности ритма  $R_b$  с координатой начала  $n_0$  всегда найдется в мелодической линии  $K'_0$  определенная высота  $W_0$ , имеющая ту же координату  $n_0$ . Значение  $W_0$  засыпается в узел метрической сетки ритма  $R_b$  с координатой  $n_0$ . Схематически это показано на рис. 5.11.

Для иллюстрации на рис. 5.12 показан случай преобразования начала мелодии песни «По Дону гуляет...», когда признак СТ присвоен всем нотам ритма  $R_b$ . (На рис. 5.10 рассмотрен другой случай, когда признак СТ присваивается нотам темы  $K_0$ .)

В строке 1 записана мелодия  $K'_0$  — метрически преобразован-

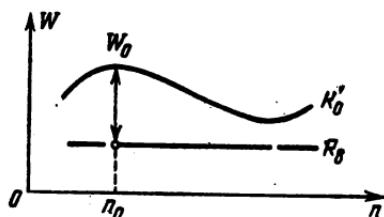


Рис. 5.11. Схема вертикального переноса инвариантных высот темы  $K'_0$  на ритм  $R_b$  вариации. Случай присвоения признака СТ нотам ритма  $R_b$  вариации.

Рис. 5.12. Вертикальный перенос инвариантов мелодической линии  $K'_0$ . Признак СТ присвоен всем нотам ритма  $R_b$  вариации.

ная исходная тема. На этом шаге результат преобразования совпадает с четвертой строкой рис. 5.10.

В строке 2 та же мелодия  $K'_0$  изображена в рабочем виде. Мелодическая линия представлена «непрерывной» линией высот с шагом дискретности, равным шестнадцатой. Начало каждой ноты отмечено сверху звездочкой.

В строке 3 помещен ритм вариации  $R_b$ . В соответствии с рассматриваемым принципом выбора стержневых нот признак СТ присвоен всем нотам этого ритма (отмечено точками).

При вертикальном переносе на каждую длительность ритма  $R_b$  с признаком СТ «нанизывается» соответствующая ей высота из «непрерывной» линии высот мелодии  $K'_0$ , представленной в строке 2. Результат этого переноса — мелодия  $K_b$ , т. е. ритм  $R_b$  со стержневыми высотами,— изображен в строке 4.

б) Признак СТ присвоен нотам мелодии  $K_0$ . В этом случае высоты нот  $K_0$  переносятся на соответствующие длительности ритма  $R_b$ . Рассмотрим два возможных случая:

61) Для длительностей ритма  $R'_0$  мелодии  $K'_0$  с координатой начала  $n_0$  существует длительность в ритме  $R_b$  с той же координатой начала  $n_0$  (рис. 5.13, а). Тогда высота  $W_0$  мелодии  $K'_0$  с ритмом  $R'_0$  из узла сетки с координатой  $n_0$  переносится в узел сетки ритма  $R_b$  с той же координатой. Это условие выполняется автоматически для всех длительностей ритма  $R_b$ , если он представляет собой простое дробление ритма  $R'_0$ , т. е. ритм  $R_b$  есть результат того, что каждая длительность из  $R'_0$  делится на  $n$  ( $n = 1, 2, \dots$ ) частей (см. строку 6 рис. 5.10).

62) Для длительности ритма  $R'_0$  с высотой  $W_0$  и координатой начала  $n_1$  не существует длительности в ритме  $R_b$  с той же координатой начала. В этом

случае всегда имеется в данном такте длительность ритма  $R_b$  с координатой начала  $n_2$ , удовлетворяющей условию  $n_2 < n_1$ , и нет такого значения  $n_3$  ( $n_2 < n_3 < n_1$ ), которое было бы координатой начала другой длительности из  $R_b$ . На рис. 5.13, б схематически пояснен этот случай.

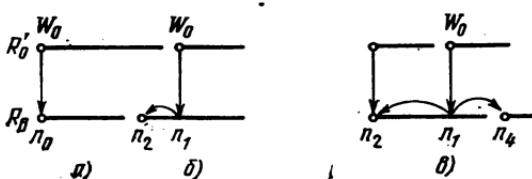


Рис. 5.13. Варианты вертикального переноса инвариантов мелодической линии. Случай присвоения признака СТ нотам темы  $K'_0$ .

Практически перенос высоты  $W_0$  происходит в узел сетки ритма  $R_b$  с координатой  $n_2$ , если этот узел не заполнен какой-то высотой, вообще говоря, отличной от  $W_0$  (рис. 5.13, в). В последнем случае предусмотрен поиск такого ближайшего к  $n_1$  узла  $n_4$  сетки, являющегося началом некоторой длительности ритма  $R_b$ , который расположен правее узла  $n_1$ . Если в такте, где расположен узел  $n_1$ , имеется такой узел с координатой  $n_4$ , то в него засыпается высота  $W_0$ ; если же такого узла в этом такте не оказывается — поиск узла заканчивается \*).

\*.) Это условие выполняется всегда, за исключением, может быть, за такта, для которого предусмотрены другие правила.

В результате вертикального переноса длительности ритма  $R_b$ , определенные нотами СТ, приобретают значения  $W_{ct}$  из  $K_b$ , отвечающие стержневым нотам (строка 7 рис. 5.10). При этом в  $R_b$  между двумя ближайшими нотами с высотами  $W_1$  и  $W_2$  (если это не соседние ноты ритма) оказываются ноты без присвоенных значений высоты. Назовем их *межвысотными*.

*Заполнение интервала между инвариантными высотами.* Под заполнением интервала между инвариантными высотами мы понимаем присвоение высот межвысотным нотам.

Пусть  $m$  — количество межвысотных нот ритма  $R_b$  между ближайшими высотами  $W_1$  и  $W_2$ ;  $\varphi = W_2 \ominus W_1$  — интервал между ними и  $q = |\varphi|$ . Искомую последовательность высот межвысотных нот обозначим таким образом:

$$W_1 \equiv W_{10}, W_{11}, \dots, W_{1b-1}, W_{1b}, \dots, W_{1m}, W_{1m+1} \equiv W_2, \quad (5.15)$$

а интервалы между высотами соседних нот —

$$\varphi_b = W_{1b} \ominus W_{1b-1}, \quad b = 1, 2, \dots, m + 1.$$

Задача сводится к отысканию последовательности интервалов

$$\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_b, \dots, \varphi_{m+1}. \quad (5.16)$$

Мелодические фигуры (5.15), заключенные между инвариантными высотами  $W_1$  и  $W_2$ , могут быть самыми различными, поскольку они не определяются инвариантами исходной мелодии. Их выбор (а следовательно, выбор последовательности интервалов (5.16)) может при некоторых условиях, рассмотренных ниже, влиять на образование констант  $C_b$  вариации  $K_b$ , в большей или меньшей степени маскируя наличие инвариантов в вариации  $K_b$ .

В зависимости от величин, присваиваемых интервалам (5.16), рассмотрим два способа заполнения интервала между  $W_1$  и  $W_2$ :

I.  $\varphi_b = 0$  и, следовательно,  $W_{1b} = W_1$ . Здесь  $b = 1, 2, \dots, r$ , где  $r$  ( $r \leq m$ ) — некоторое значение, определяемое из дополнительных условий. Например,  $r$  — количество нот, содержащихся в первых  $h$  долях такта, где  $h = t_b$  или  $t_b - 1$ . При  $r < m$  высоты присваиваются не всем  $m$  нотам последовательности (5.16), а лишь первым  $r$  из них; остальные межвысотные ноты заполняются на следующем этапе уже другим способом.

В строке 8 рис. 5.10 заполнение таким способом отмечено горизонтальными скобками. Во всех тактах, кроме 5, 6, 7,  $r = m$ , а в 5 и 6 —  $h = 3$  ( $r < m$ ). В тактах 1, 3, 5 и 6 образуется константа вариации — четырехкратное проведение мелодической фигуры, представляющей собой последовательность одновысотных нот, расположенных в первых трех долях такта.

II.  $\varphi_b \neq 0$ , откуда следует  $W_{1b} \neq W_{1b-1}$  для всех  $b = 1, 2, \dots, m + 1$ . Такое заполнение можно осуществить различными приемами.

В описываемом алгоритме способ II реализован при следующих дополнительных условиях: 1) интервалы  $\varphi_b$  выбираются наименьшими из возможных; 2) число перемен направления движения искомых высот (5.15) минимально. Тогда задача отыскания интервалов  $\varphi_b$  заключается в разбиении интервала  $q$  ( $q = |\varphi_b|$ ) на  $m+1$  интервалов  $\varphi_b$  так, чтобы удовлетворялись эти два условия.

Рассмотрим два возможных случая:

IIa)  $m < q$ , т. е.  $m+1$  — число интервалов  $\varphi_b$  — не превышает числа ступеней  $q$  между  $W_1$  и  $W_2$  (рис. 5.14, а);  $q$  выражается следующим образом:

$$q = (m+1)f + d, \quad 0 \leq d < m+1. \quad (5.17)$$

Отсюда по известным  $q$  и  $m$  находим целые  $f$  и  $d$ . Значения  $\varphi_b$  последовательности (5.16) в этом случае определяются следующим путем.

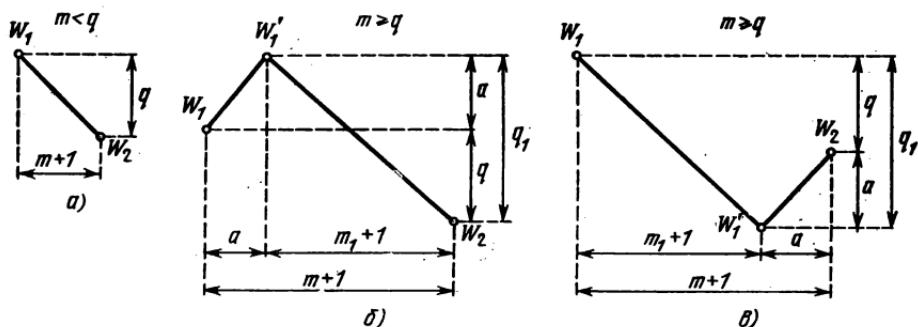


Рис. 5.14. Схемы заполнения интервала  $\varphi$  между высотами  $W_1$  и  $W_2$ .

Из (5.17) видно, что интервал  $q$  разбивается на  $m+1$  отрезков по  $f$  ступеней в каждом и на остаток в  $d$  ступеней. Поскольку всегда  $d < m+1$ , то  $d$  интервалов полагаем равными  $f+1$ , а оставшиеся интервалы —  $f$ . Это следует и из представления (5.17) в таком виде:

$$q = (m+1)f + d = (f+1)d + f(m+1-d).$$

Присваивая найденным значениям  $f+1$  и  $f$  знак  $\text{sign } \varphi$ , располагаем их в последовательность (5.16).

При  $d=0$  все  $m+1$  интервалов  $\varphi_b$  равны  $f$  и расположение их в (5.16) однозначно (см. ниже тант 4 вариации  $K_2$  на рис. 5.19). При  $d \neq 0$  указанные  $d$  интервалов  $f+1$  можно расположить либо в начале последовательности, либо в ее конце, либо перемешивая их случайным образом с оставшимися интервалами. Этим достигается мелодическое разнообразие. Однако для образования константы вариации порядок заполнения дол-

жен быть одним и тем же, чтобы обеспечить повторность одной и той же мелодической фигуры.

IIб)  $m \geq q$ , т. е. число  $m + 1$  интервалов  $\varphi_b$  больше величины интервала  $q$ . Движение всех нот  $W_{1b}$  из (5.15) ( $b = 1, 2, \dots, m$ ) в одном направлении (вверх или вниз) невозможно, даже если все значения  $\varphi_b$  выбрать наименьшими. Поэтому, чтобы удовлетворить условиям 1) и 2), переносим часть нот  $W_{1b}$  с наименьшими интервалами (в поступенном движении) в направлении, противоположном движению от  $W_1$  к  $W_2$ . Тогда остальные ноты будут заполнять уже новый интервал, больший чем  $q$ , в соответствии со случаем IIа) (рис. 5.14, б). Формально в программе это выглядит следующим образом.

Обозначим  $a = \left[ \frac{m - q + 2}{2} \right]$ . Первые  $a$  нот последовательности (5.15) перенесем от  $W_1$  к  $W_1'$  в поступенном движении (с интервалами, равными 1) в противоположную сторону от  $W_2$ , т. е. со знаком  $-\text{sign } \varphi$ :

$$W_{1b} = W_{1b-1} \oplus \varphi_b, \quad \text{где } \varphi_b = -1 \text{ sign } \varphi, \quad b = 1, 2, \dots, a.$$

Оставшиеся  $m_1 = m - a$  нот (5.15) заполняют интервал  $q_1 = q + a$  между  $W_1'$  и  $W_2$  в соответствии с описанной выше процедурой случая IIа), поскольку  $m_1 < q_1$ .

Покажем теперь справедливость неравенства  $m_1 < q_1$ . Для целых неотрицательных  $n$  справедливо неравенство

$$\left[ \frac{n}{2} \right] \leq \frac{n}{2} \leq \left[ \frac{n+1}{2} \right]. \quad (5.18)$$

Покажем, что если  $m \geq q$ , то  $m - a < q + a$ , где

$$a = \left[ \frac{m - q + 2}{2} \right] = \left[ \frac{m - q}{2} \right] + 1.$$

Применяя левую часть неравенства (5.18), имеем

$$q + a - (m - a) = 2a - (m - q) =$$

$$= 2 \left[ \frac{m - q}{2} \right] + 2 - (m - q) \leq m - q + 2 - (m - q) = 2,$$

откуда  $q + a - (m - a) \leq 2$ , т. е.  $q_1 - m_1 \leq 2$ .

Используя правую часть (5.18), имеем

$$q + a - (m - a) = q - m + 2a =$$

$$= q - m + 2 \left[ \frac{m - q + 1 + 1}{2} \right] \geq q - m + (m - q + 1) = 1$$

и, следовательно,

$$q + a - (m - a) \geq 1, \quad \text{т. е. } q_1 - m_1 > 0, \quad \text{или } q_1 > m_1.$$

Таким образом, имеет место неравенство  $0 < q_1 - m_1 \leq 2$ , и соотношение (5.17) приобретает вид

$$q_1 = (m_1 + 1)f + d. \quad (5.19)$$

Заметим, что указанные  $a$  интервалов можно расположить и в конце последовательности интервалов  $\varphi_b$ , как показано на рис. 5.14, в.

Большое разнообразие мелодических фигур, образованных при заполнении межвысотных нот, достигается тем, что все  $m + 1$  полученных интервалов  $\varphi_b$ , а именно:  $a$  интервалов  $-1 \operatorname{sign} \varphi$ ,  $d$  интервалов  $(f+1) \operatorname{sign} \varphi$  и  $m+1-a-d$  интервалов  $f \operatorname{sign} \varphi$  могут быть расположены в последовательности (5.16) в любом порядке. Здесь важно лишь, чтобы их сумма  $\sum \varphi_b$  была равна разности высот  $W_2$  и  $W_1$  — интервалу  $\varphi$ , а это условие в нашем случае выполняется всегда. Действительно, учитывая (5.19), получаем

$$\begin{aligned} \sum_{b=1}^{m+1} \varphi_b &= -a \operatorname{sign} \varphi + d(f+1) \operatorname{sign} \varphi + (m+1-a-d)f \operatorname{sign} \varphi = \\ &= ((m+1-a)f + d - a) \operatorname{sign} \varphi = q \operatorname{sign} \varphi = \varphi. \end{aligned}$$

В программе предусмотрены различные способы взаимного расположения не отдельных интервалов  $\varphi_b$ , а таких их групп, в каждой из которых составляющие ее интервалы одинаковы и равны 1,  $f$  или  $f+1$ . При  $m < |\varphi|$  прямым расположением двух групп  $d$  и  $m+1-d$  интервалов будем называть

$$\underbrace{f+1, f+1, \dots, f+1}_{d}, \quad \underbrace{f, f, \dots, f}_{m+1-d}, \quad (5.20)$$

а обратным ему —

$$\underbrace{f, f, \dots, f}_{m+1-d}, \quad \underbrace{f+1, f+1, \dots, f+1}_{d}. \quad (5.20a)$$

При  $m \geq |\varphi|$  прямые расположения двух групп по  $a$  и  $m+1-a$  интервалов ( $a$  интервалов берутся со знаком  $-\operatorname{sign} \varphi$ , а остальные интервалы — со знаком  $\operatorname{sign} \varphi$ ) имеют такой вид:

$$\left. \begin{array}{c} \underbrace{1, 1, \dots, 1}_{a}, \quad \underbrace{f+1, f+1, \dots, f+1}_{d}, \quad \underbrace{f, f, \dots, f}_{m+1-d}, \\ | \quad \quad \quad | \quad \quad \quad | \\ \underbrace{1, 1, \dots, 1}_{a}, \quad \underbrace{f, f, \dots, f}_{m+1-d}, \quad \underbrace{f+1, f+1, \dots, f+1}_{d} \\ | \quad \quad \quad | \quad \quad \quad | \\ m+1-a \end{array} \right\} \quad (5.21)$$

а обратные им —

$$\left. \begin{array}{c} \overbrace{\underbrace{f+1, f+1, \dots, f+1}_{d}, \quad \underbrace{f, f, \dots, f}_{m_1+1-d}, \quad \underbrace{1, 1, \dots, 1}_{a}} \\ \overbrace{\underbrace{f, f, \dots, f}_{m_1+1-d}, \quad \underbrace{f+1, f+1, \dots, f+1}_{d}, \quad \underbrace{1, 1, \dots, 1}_{a}} \\ \hline \overbrace{\quad \quad \quad m+1-a} \\ \hline \end{array} \right\} \quad (5.21a)$$

В программе предусмотрено размещение интервалов в соответствии с (5.21) и (5.21a), поскольку расположения (5.20) и (5.20a) вытекают из него при  $a = 0$ .

При анализе мелодии И. Дунаевского «Молодежная» установлено, что в ее седьмом такте интервалы располагаются в соответствии со строкой 2 (5.21a).

Пример. Последний прием использован в такте 7 машинной вариации при заполнении интервала между высотами *фа* и *до* (строка 10 рис. 5.10). Проиллюстрируем рассмотренный способ заполнения.

Из строки 9 имеем  $W_1 = 24$ ,  $W_2 = 21$ ,  $m = 7$ ,  $\varphi = 21 \Theta 24 = -3$ ,  $q = |-3| = 3$ ,  $m > q$ .

Находим значение  $a = \left[ \frac{m-q+2}{2} \right] = \left[ \frac{7-3+2}{2} \right] = 3$ , откуда  $m_1 = m - a = 4$ ,  $q_1 = q + a = 6$ . Далее перейдем к отысканию интервалов, учитывая, что  $m_1 < q_1$  ( $4 < 6$ ).

Подставляя в (5.19) значения  $m_1$  и  $q_1$ , получаем  $6 = 5f + d$ , откуда  $f = 1$ ,  $d = 1$ . Последовательность  $m+1=8$  интервалов (5.16) располагается следующим образом:

$$\underbrace{1, 1, 1}_{a}, \quad \underbrace{-2}_{d}, \quad \underbrace{-1, -1, -1, -1}_{m_1+1-d}.$$

Одной из возможных модификаций этого расположения служит обратное ему расположение (5.21a):

$$\underbrace{-1, -1, -1, -1}_{m_1+1-d}, \quad \underbrace{-2}_{d}, \quad \underbrace{1, 1, 1}_{a}. \quad (5.22)$$

Искомую последовательность высот (5.15) получаем из (5.22) по соотношению

$$W_{1b} = \dot{W}_{1b-1} \oplus \varphi_b, \quad b = 1, 2, \dots, 8,$$

где  $\varphi_b$  — интервалы (5.16). Она имеет вид

$$24, 23, 22, 21, 17, 15, 16, 17, 21$$

(строка 10, такт 7 на рис. 5.10).

Это заполнение является реализацией, или есть проведение второй константы мелодии, которая характеризуется тем, что непосредственно предшествующая первой ноте такта затақтова нота движется снизу вверх. Эта константа появилась на границах тактов 1—2 и 3—4 в качестве инварианта и повторилась при заполнении оставшихся межвысотных нот в тактах 5, 6 и 7 (отмечено скобками в строке 10 рис. 5.10).

*Формирование затақта.* Направление движения в мелодии затақтовых нот к первой ноте каждого такта является важным выразительным средством. На рис. 5.15 показано, как меняется характер мелодии при изменении первоначального направления движения затақтовых нот. В первой строке на рисунке приведен отрывок мелодии песни А. Гурилева «Не шуми ты, рожь».



Рис. 5.15. Варианты организации направления движения затақтовых нот.

указывают направление движения затақтовых нот к нотам  $W_2^i$ , расположенным на сильной доле каждого  $i$ -го такта ( $i = 1, 2, 3, 4$ ). Во второй и третьей строках мелодия несколько изменена вследствие заранее заданного направления движения затақтовых нот, указанного стрелками. При этом полностью сохранены значения высот  $W_2$ , а затақтовые ноты сохраняются, лишь если направление движения затақтовой ноты совпадает с первоначальным.

При заданных значениях высот  $W_1$  и  $W_2$  направление движения затақтовых нот к ноте  $W_2$ , расположенной на первой — сильной доле такта, связано с расположением  $a$  интервалов  $-1 \text{ sign } \varphi$  в начале или в конце последовательности (5.16). На рис. 5.14 схематически представлены для случая  $m \geq |\varphi|$  два варианта заполнения, отличающиеся друг от друга порядком взаимного расположения групп  $a$  и  $m + 1 - a$  интервалов между нотами  $W_1$  и  $W_2$ . При  $W_1 > W_2$  на рис. 14, б затақтовые ноты идут к  $W_2$  сверху вниз, а на рис. 14, в — наоборот. Таким образом, устанавливается определенная зависимость между тремя параметрами: значением  $\text{sign } \varphi$ , направлением движения затақтовых нот и расположением  $a$  интервалов  $-1 \text{ sign } \varphi$  в начале или в конце последовательности (5.16) межвысотных нот.

Задание направления движения затачтовых нот предусмотрено в алгоритме путем введения структуры

$$S_{\text{нз}} = s_1 s_2 \dots s_i \dots s_8. \quad (5.23)$$

Значение  $s_i$  ( $s_i = 0, 1, 2$ ) указывает направления движения затачта к первой ноте  $i$ -го такта:  $s_i = 1$  — вверх,  $s_i = 2$  — вниз. При  $s_i = 0$  рабочее значение (1 или 2) заранее не задано и выбирается в процессе работы программы случайным образом.

Так, например, для мелодии «Молодежной» (строка 10 рис. 5.10)  $S_{\text{нз}} = 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1$ , т. е. значения  $s_i$  для всех тактов ( $i = 1, 2, \dots, 8$ ) равны 1, поскольку непосредственно предшествующая сильной, первой ноте каждого такта нота расположена ниже.

Структура  $S_{\text{нз}}$  введена для обеспечения принудительного направления движения тех межвысотных нот, которые расположены в самом конце некоторого такта и, следовательно, являются затачтовыми для первой ноты следующего такта. Поскольку первая нота каждого такта имеет по условию признак СТ, ее высота отлична от нуля.

Таким образом, элементы  $s_i$  структуры  $S_{\text{нз}}$  используются только в том случае, если нота  $W_2$ , ограничивающая межвысотные ноты справа, является первой нотой  $i$ -го такта, а число межвысотных нот  $m$  не равно нулю.

Разные варианты структуры  $S_{\text{нз}}$ , предусмотренные в программе, приводят при прочих равных условиях к разной организации направления затачтов и, как следствие, к разным и разнохарактерным мелодиям. Примером могут служить две последние мелодии на приведенном ниже рис. 5.20, отличающиеся лишь направлением затачта в тактах 2, 6 и 14.

В алгоритме предусмотрено также задание числа затачтовых нот, непосредственно предшествующих первой ноте такта и следующих в одном направлении.

**Знаковая секвенция.** Знаковая секвенция, определенная выше (см. § 3.3) как изменение мелодической фигуры с сохранением последовательности знаков интервалов (а не самих интервалов, как в секвенции), является одной из операций, используемых при преобразовании (варьировании) мелодии. Для пояснения того, как используется знаковая секвенция, рассмотрим ряд признаков, которые приписываются некоторым нотам, играющим в мелодии особую роль. К этим признакам относятся ПП, П и ОП.

ПП — признак предпоследней ноты построения, П — признак последней ноты построения, ОП — признак опорной ноты, который может быть присвоен нотам мелодии разными способами в зависимости от так называемого типа опорности метрической координатной сетки. Шагом дискретности сетки и наименьшей допустимой длительностью на этом этапе, когда мелодия кодируется понотно, является восьмая.

Запрограммированы следующие четыре типа опорности:

1) опорная самая первая восьмая каждого такта метрической сетки, т. е. сильная доля такта;

2) опорная первая восьмая каждой четверти в такте;

3) опорные первые восьмые 1-й и  $(t - 1)$ -й четвертей в такте;

4) опорные первые восьмые 1-й и  $t$ -й четвертей в такте.

Здесь  $t$  ( $t \in \{3, 4\}$ ) — код значения тактового размера, соответствующий размерам  $3/4$  и  $4/4$ .

На рис. 5.16 изображена метрическая сетка в допустимых на этом этапе длительностях (с шагом дискретности, равным восьмой) для тактовых размеров  $3/4$  и  $4/4$ . Крестиками отмечены опорные ноты для всех четырех типов опорности.

Признак ОП присваивается определенным нотам мелодии следующим образом. Исходная мелодия накладывается на метрическую сетку (как было показано на рис. 5.2), выбирается один из

$\frac{3}{4}, t = 3$

$\frac{4}{4}, t = 4$



Рис. 5.16. Варианты распределения опорных нот в такте для трехдольного и четырехдольного метров.

начинающийся с опорной ноты и кончающийся нотой, непосредственно предшествующей ноте с признаком ОП или ПП.

В частном случае, когда подряд расположены две ноты с признаком ОП или две ноты, из которых одна — с признаком ОП, а другая — с признаком ПП, знаковая секвенция не применяется, поскольку мелодическая фигура состоит из одной ноты и не содержит интервалов.

В мелодии, преобразованной в соответствии со знаковой секвенцией, высоты нот с признаками ОП, ПП, и П не изменяются. Высоты остальных нот изменяются так, чтобы в соответствии с определением знаковой секвенции в преобразованной мелодии сохранялась та же последовательность знаков интервалов, что и в исходной мелодии.

Преобразование по принципу знаковой секвенции видоизменяет звуковысотную линию, но полностью сохраняет ритм исходной мелодии, а следовательно, и число нот в каждом такте и во всей мелодии  $K_0$ .

типов опорности и рассматривается каждая нота мелодии. Если начало ноты совпадает с опорной долей метрической сетки, то этой ноте присваивается признак ОП. Заметим, что самая первая нота мелодии, даже если мелодия начинается с за- такта, всегда имеет признак ОП.

С учетом сказанного ясно, что знаковая секвенция — это перенос мелодической фигуры с сохранением последовательности знаков интервалов. Под мелодической фигурой здесь понимается отрезок мелодии,

кончающийся нотой, непосред-

*Преобразование ритма  $R_0$  темы, при котором изменяются длительности нот, но сохраняются высоты и число нот темы.*

Для каждого значения параметра «изменение длительностей» предусмотрена единая для всех тактов мелодии схема такого преобразования, не зависящая от номера  $i$  такта мелодии ( $i = 1, 2, \dots, 7$ ). Она зависит лишь от числа нот в такте и от допустимого в программе метра. При этом преобразовании длительности нот нулевого такта (затакт) и восьмого такта остаются неизменными, поскольку при ненулевом затакте они заполняются не полностью. А в результате такого преобразования длина затакта сохраняет свое значение.

Для примера рассмотрим набор ритмических фигур для одного из значений параметра «изменение длительностей» и тактового размера  $3/4$ .

Число нот в такте ритма  $R_0$ :    1            2            3            4

Искомая ритмическая фигура:  $\text{J.} ; \text{J J} ; \text{J. JJ} ; \text{J. JJJ}$ .

Подобным образом строятся наборы ритмических фигур и для других значений параметра «изменение длительностей».

Исходная ритмическая фигура каждого такта ритма  $R_0$  заменяется другой — искомой ритмической фигурой из заданного набора фигур, состоящей из того же числа нот, что и первоначальная. При этом длительности нот исходной фигуры ставятся во взаимно однозначное соответствие (вообще говоря, другим) длительностям искомой фигуры, так что высоты при соответствующих нотах сохраняются, как сохраняется число нот в каждом такте и, следовательно, во всей мелодии. Поэтому это преобразование удобно производить с мелодией, закодированной понятным способом.

### § 5.3. Некоторые результаты программной реализации варьирования мелодий

*Особенности программы. Распечатка результатов. Повторность — основное свойство мелодии массовой песни. Примеры. Блок-схема программы.*

*Особенности программы.* В соответствии с вышеизложенными принципами варьирования мелодии автором была написана на языке Алгол-60 программа «Вариация», реализованная на машине БЭСМ-6.

При работе с программой вводится набор значений параметров  $M_c$ , среди которых — инварианты  $I_0$ , трансформанты  $T_b$  и константы  $C_b$  мелодии. Выбор фиксированных значений исходных параметров произведен и зависит от поставленной задачи, от начальных ограничений и требований, которые предъявляются к результатам работы программы. Параметры, не заданные в начальном наборе  $M_c$ , формируются в процессе работы программы

215	2421	3117	3121	4222	5217	6215	8424	9123	9124	10225	11223
12221	144226	15124	15126	16225	17223	18225	19224	20222	21225	23421	

## ВАРИАЦИЯ МАЖОР

0	0	0	15	21	21	17	22	17	15	24	24	23	25	23	21	21
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	15	21	21	21	0	0	0	15	24	24	24	0	0	21
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	26	26	25	25	25	25	24	24	24	22	17	16	21	21	21	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	26	26	24	25	25	25	23	23	23	21	15	17	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

## ПАРАМЕТРЫ

1МГ	23С	З0П	4МН	5РЗ	6МП	738	8МТ	9СТ	10ПИ	113М	12В3	130Т	14УД	15ПП	160Г	17И3	18ЧН
0	0	0	2	4	1	1	7	4	3	1	8	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	2	4	3	1	7	4	3	1	8	0	0	0	0	0

## ВАРИАЦИЯ МИНОР

0	0	0	13	16	16	815	17	815	13	13	22	22	22	21	23	21	16	16
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	13	16	16	16	0	0	0	13	22	22	22	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
26	26	24	23	23	23	23	22	22	22	22	17	815	14	16	16	16	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
24	24	24	22	23	23	23	21	21	21	16	13	815	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Рис. 5.17. Распечатка полученного результата. В закодированном виде печатается заданная тема — мелодия русской народной песни «По Дону гуляет...», сочиненная машинной вариацией этой темы в мажоре и миноре, а также наборы значений параметров — начальный (верхняя строка) и рабочий (нижняя строка). Расшифровка параметров не приводится. Декодированная запись вариации в общепринятой нотации представлена собой мелодию К<sub>1</sub> на рис. 5.18.

случайным образом. Помимо указанных параметров также вводится исходная мелодия — тема  $K_0$ , закодированная понотно в соответствии с (5.3).

При необходимости может быть введен и ритм  $R_b$  искомой вариации, задаваемый закодированной последовательностью длительностей, которая после ввода в машину автоматически кодируется потактно. Преобразование заданной мелодии осуществляется в До мажоре.

*Выдача результатов.* Результаты работы программы печатаются АЦПУ в следующей последовательности: исходная тема  $K_0$ , затем вариация  $K_b$  в мажоре и миноре и далее наборы значений параметров мелодии  $M_c$  — начальный и рабочий.

Пример распечатки результата показан на рис. 5.17. Напечатанная здесь понотно исходная мелодия представляет собой запись мелодии «По Дону гуляет...», представленной в нотной записи в строке 1 рис. 5.10. Далее потактно напечатана полученная вариация  $K_b$  («Молодежная») в До мажоре и ля миноре. После первой вариации помещены соответствующие коды начального и рабочего наборов значений параметров.

Из приведенного выше рассмотрения параметров преобразования мелодии видно, что искомая вариация получается в результате их последовательного применения. В программе предусмотрена возможность выдачи на печать промежуточных результатов, полученных после реализации каждого преобразующего оператора. Такая последовательная трансформация исходной мелодии иллюстрируется рис. 5.10.

Приведенный пример получения программным путем из мелодии «По Дону гуляет...» мелодии «Молодежной» подтверждает правильность сформулированных гипотез о закономерностях процессов композиции, в частности правильность гипотез о механизме порождения мелодий, синтаксическая структура которых соответствует мелодиям массовой песни, а также о характере связей мелодии с темой и способах ее преобразования.

Программное доказательство этого положения подтверждают примеры, приведенные на рис. 5.18, 5.19 и 5.20, на которых в обычной нотной записи представлены: тема — мелодия  $K_0$  и несколько различных вариаций  $K_b$  этой темы, полученных с помощью программы «Вариация».

На рис. 5.19 исходной темой является мелодия «Чижика-прыжика». Обратим внимание на первые две вариации  $K_1$  и  $K_2$  этой мелодии. Обе они относятся к наиболее простому виду — орнаментальным вариациям. Несмотря на то, что тема — «Чижик-прыжик» — самая популярная из мелодий русских народных песен, в ее орнаментальной вариации  $K_2$ , как показывают эксперименты в различных аудиториях, даже с высоким (профессиональным) уровнем музыкальной подготовленности, трудно услышать исходную тему. Это же относится и к вариации  $K_5$ . При

Тема: «Чижик-пыхик»

Машинные вариации

$K_0$

$K_1$

$K_2$

$K_3$

$K_4$

$K_5$

Рис. 5.19. Тема  $K_0$  — мелодия популярной песни «Чижик-пыхик» — и вариации  $K_1$  ( $v=4, 2, 3, 4, 5$ ), сочиненные машиной ВЭСМ-6.

Тема: «По Дону гуляет...»

Машинные вариации

The musical score consists of five staves, each representing a different machine variation ( $K_0$ ,  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ ,  $K_4$ ). The first staff ( $K_0$ ) shows the original folk melody. Subsequent staves show variations where specific notes or patterns are altered. The title 'Машинные вариации' is centered above the staves, and the theme 'По Дону гуляет...' is mentioned at the top left.

Рис. 5.48. Тема  $K_0$  — мелодия народной песни «По Дону гуляет...» — и вариации  $K_v$  ( $v = 1, 2, 3, 4$ ), сочиненные электронной вычислительной машиной БЭСМ-6. Мелодия  $K_1$  совпадает с мелодией известной песни И. Дунаевского «Молодежная» (за исключением первой ноты последнего такта).

Тема: «Наша жизнь коротка»

Машинные вариации

$K_0$

$K_1$

$K_2$

$K_3$

$K_4$

$K_5$

$K_6$

Рис. 5.20. Тема  $K_0$  — мелодия народной песни «Наша жизнь коротка» — в вариации  $K_5$  ( $v=1, 2, 3, 4, 5, 6$ ), сочиненные машиной БЭСМ-6.

прослушивании же вариации  $K_1$  сходство с темой улавливается сразу.

Рассмотренные примеры показывают, что путем варьирования исходной темы, в том числе и программном, удается получать новые или воспринимаемые на слух как новые мелодии, т. е. что варьирование может являться и действительно является одним из методов сочинения, реализуемым на ЭВМ.

*Блок-схема программы.* Принципиальная блок-схема работы программы, приведенная на рис. 5.21, показывает порядок выполнения различных этапов преобразования исходной мелодии.

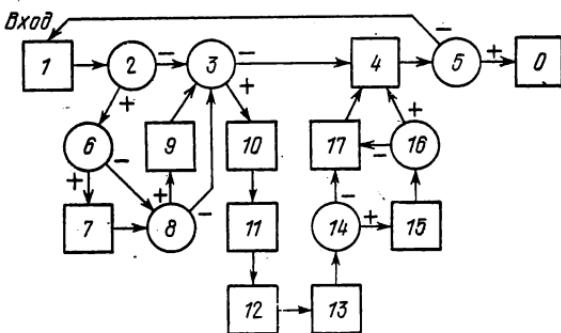


Рис. 5.21. Принципиальная блок-схема работы машинной программы для варьирования заданной мелодии.

В описании блок-схемы указывается, на каком этапе работы программы проявляется действие того или другого переменного параметра из набора  $M_c$ . Меняя в наборах  $M_c$  значение параметра и оставляя неизменными другие параметры (исходная тема  $K_0$ , ритм вариации  $R_v$  и т. п.), можно сознательно конструировать и видоизменять различные фрагменты искомой мелодии, что влияет на эмоциональное содержание всей мелодии в целом. Благодаря этому находится зависимость между значениями параметров и эмоциональной направленностью полученной мелодии.

*Описание функций узлов блок-схемы.* Кружками обозначены логические блоки, проверяющие выполнение некоторого условия и имеющие два выхода. В случае выполнения условия управление передается по стрелке со знаком  $+$ , в противном случае — по стрелке со знаком  $-$ . Нелогические блоки обозначены квадратиками.

**Блок 1.** Ввод в числовом коде с перфокарт темы  $K_0$ , ритма вариации  $R_v$  и начального набора значений параметров  $M_c$ .

**Блок 2.** Условие: исходная тема преобразуется в понотном коде.

**Блок 3.** Условие: текущая мелодия, т. е. мелодия, полученная к данному этапу, преобразуется в потактовом коде.

#### Блок 4. Распечатка результата.

Блок 5. Условие: работа окончена. В противном случае — переход к соответствующему оператору блока 1 и синтезирование очередной мелодии  $K_b$  с измененными значениями параметров из набора  $M_c$ , или с новым ритмом  $R_b$ , или с новой темой  $K_b$ .

#### Блок 6. Останов.

В блоках 6—9 происходит преобразование исходной темы  $K_0$ , представленной понятным способом кодирования. При этом число нот в каждом такте и во всей мелодии остается неизменным.

#### Блок 6. Условие: преобразуется ритм $R_0$ темы.

Блок 7. Преобразование ритма  $R_0$  темы, при котором сохраняется высота каждой ноты мелодии и изменяется ритмическая фигура каждого такта по единой для всех тактов схеме, определяемой выбранным значением параметра «изменение длительности» (см. § 5.2).

#### Блок 8. Условие: преобразуется звуковысотная линия темы $K_0$ .

Блок 9. Присвоение признака ОП опорной ноты определенным нотам текущей мелодии, выбираемым в зависимости от значения параметра «тип опорности», и преобразование звуковысотной линии по принципу знаковой секвенции (см. § 5.2).

В блоках 10—17 происходит преобразование текущей мелодии в потактовом коде.

Блок 10. Представление текущей мелодии в рабочем виде — непрерывной линией высот с шагом дискретности, равным длительности шестнадцатой (см. § 5.1). Каждая ячейка числового массива, куда засыпается эта мелодия, служит узлом координатной метрической сетки. Начало каждой ноты мелодии отмечается в соответствующем узле-ячейке признаком начала длительности (число 900; см. с. 136), что позволяет в непрерывной звуковысотной линии определить ритм мелодии.

Блок 11. Формирование ритма  $R_b$  искомой вариации одним из трех способов, предусмотренных в алгоритме (см. § 5.2), в зависимости от значения параметра «ритм вариации».

Блок 12. Преобразование метра  $t_0$  мелодии  $K_0$ , наложенной на метрическую сетку (см. § 5.1), в соответствии с метром  $t_b$  ритма вариации  $R_b$  и значением параметра «тип метропреобразования», определяющего вариант структуры  $S_{mp}$  (5.14). Вместе с метром преобразуется и представленная в рабочем виде мелодия, привязанная к координатной метрической сетке.

Блок 13. Присвоение признака СТ стержневой ноты определенным нотам темы или ритма вариации, выбираемым в зависимости от значения параметра «тип присвоения СТ-нот», и вертикальный перенос инвариантных высот мелодической линии темы в вариацию (см. § 5.2) с учетом значения параметра «правый перенос» (см. рис. 5.13, в).

К этому этапу текущая мелодия  $K'_0$  преобразована метрически в соответствии с метром вариации  $t_b$ ; поэтому координатные метри-

ческие сетки ритма  $R_0$  текущей мелодии и ритма  $R_b$  вариации совпадают между собой.

**Блок 14.** Условие: переход к блоку 15.

**Блок 15.** Заполнение межвысотных нот при совпадении высот соседних нот способом I на определенную глубину (т. е. часть такта, начиная с его первой доли), которая определяется значением параметра «вариант заполнения на определенную глубину». В результате этого высоты могут быть присвоены не всем межвысотным нотам. В таком случае не заполненные высотами ноты, оставшиеся межвысотными после этого предварительного заполнения, приобретают свои высоты на следующем этапе (блок 17) уже другим способом.

**Блок 16.** Условие: закончено заполнение высотами всех межвысотных нот.

**Блок 17.** Заполнение межвысотных нот при несовпадении высот соседних нот — способом II.

Это заполнение производится последовательно — от начала мелодии и до ее конца — на каждом участке  $m$  межвысотных нот ( $m > 0$ ), расположенных между двумя пинулевыми высотами  $W_1$  и  $W_2$  (интервал между ними  $\varphi = W_2 \ominus W_1$ ). На каждом таком участке производятся следующие операции.

В зависимости от соотношения чисел  $m$  и  $|\varphi|$  ( $m < |\varphi|$  или  $m \geq |\varphi|$ ) реализуется соответствующий вариант заполнения межвысотных нот.

Для получения искомой последовательности высот (5.15) вычисляются  $m+1$  интервалов величиной 1,  $f$  и  $f+1$ , которые могут быть расположены на рассматриваемом участке по-разному. При этом по значениям соответствующих параметров устанавливается прямой или обратный порядок расположения этих интервалов в последовательности (5.16), т. е.  $d$  интервалов  $f+1$  и  $m+1-d$  интервалов  $f$  по формулам (5.20), (5.20а) при  $m < |\varphi|$  (параметр «порядок расположения интервалов  $f+1$  и  $f$ ») или  $a$  интервалов 1 и  $m+1-a$  интервалов  $f+1$ ,  $f$  по формулам (5.21), (5.21а) при  $m \geq |\varphi|$  (параметр «порядок расположения  $a$  интервалов»).

Попутно производится организация принудительного движения вверх или вниз нескольких межвысотных нот, расположенных в конце  $(i-1)$ -го такта, к первой ноте  $i$ -го такта мелодии. Направление движения этих нот в каждом такте определяется значением элемента  $s_i$  структуры направления затаакта (5.23), вариант которой выбирается в соответствии со значением параметра «структура направления затаакта».

Наибольшее число затаактовых нот, непосредственно предшествующих первой ноте такта и идущих к ней в одном движении, задается значением параметра «число нот затаакта».

Как выяснено в § 5.2, между тремя переменными —  $\text{sign } \varphi$ ,  $s_i$  и значением параметра «порядок расположения  $a$  интервалов» — устанавливается определенная зависимость. Поэтому при заранее

заданных значениях всех трех величин возможно возникновение противоречия, которое в процессе работы программы устраняется установлением приоритета одной из двух величин —  $s_i$  или значения параметра «порядок расположения  $a$  интервалов» (величина  $\text{sign } \varphi$  всегда остается неизменной).

#### § 5.4. Синтез мелодии как средство для ее анализа

*Стихотворный ритм «Молодежной». Песенный ритм. Принцип простоты в массовой песне. Мелодия «Молодежной» — одна из многих вариаций. Этапы варьирования мелодической линии темы. Поликонстантность. Промежуточные результаты варьирования.*

Выше в § 4.4 уже отмечалось, что имитационное моделирование является не только способом проверки гипотез о закономерностях, лежащих в основе изучаемого процесса (в нашем случае процесса композиции), но и может быть использовано для анализа результатов, найденных в ходе этого процесса.

Так, получив модельным путем мелодию, достаточно близкую к интересующей исследователя, можно установить те особенности ее структуры, средства и допущения, которые были использованы в процессе ее сочинения. В § 5.3 было показано, что, анализируя промежуточные результаты машинного варьирования исходной темы, можно выделить использованные программой инварианты, трансформанты и константы, характеризующие полученную мелодию — вариацию исходной темы.

В качестве характерного примера анализа мелодий по результатам их машинного синтезирования рассмотрим мелодию песни И. Дунаевского «Молодежная» из кинофильма «Волга-Волга». Анализ именно этой мелодии представляет определенный интерес, так как известно, что в качестве исходного материала для ее сочинения композитор выбрал мелодию песни «По Дону гуляет...», приведенную в строке 1 на рис. 5.10. Этот факт позволяет при анализе восстановить в некоторой мере процесс работы композитора и выделить использованные им приемы преобразования выбранной мелодии. При анализе мы будем широко пользоваться методикой исследования закономерностей стихотворного и песенного ритмов на ЭВМ, изложенной в опубликованной ранее работе автора (Р. Х. Зарипов, 1971а).

*Стихотворный ритм «Молодежной».* Как известно, мелодия «Молодежной» сочинялась на слова В. Лебедева-Кумача, и ее ритм должен соответствовать стихотворному ритму этих слов. Будем исходить из того, что И. Дунаевский сочинял мелодию к уже готовому тексту стихотворения, первый куплет которого имеет вид:

Въется дымка золотая, придорожная...  
Ой ты, радость молодая, невозможная!  
Точно небо, высока ты, точно море, широка ты,  
Необъятная дорога молодежная.

(5.24)

Под стихотворным ритмом понимается упорядоченная последовательность ударных и безударных слогов, на которые разбивается каждая строка стихотворного текста.

В соответствии с общепринятой системой обозначений стихотворный ритм «Молодежной» записывается следующим образом:

$$\begin{aligned} R_{ct1} &: - \textcircled{u} - \\ R_{ct2} &: - \textcircled{u} - \\ R_{ct3} &: - \textcircled{u} - \\ R_{ct4} &: - \textcircled{u} - \textcircled{u} - \textcircled{u} - \textcircled{u} - \textcircled{u} - \textcircled{u} - \end{aligned} \quad \left. \right\} \quad (5.25)$$

Здесь знаком — обозначается ударный слог, а знаком  $\textcircled{u}$  — безударный. Заметим, что в теории стихосложения подобная ритмическая фигура, характеризуемая двусложной стопой с ударением на первом слоге (—  $\textcircled{u}$ ), называется хореем.

Легко видеть, что все строки имеют одинаковую ритмическую фигуру и только третья строка содержит больше слов (16), чем остальные (13).

*Песенный ритм.* Под песенным ритмом  $R_n$  будем понимать распространенный в композиторской практике частный случай ритма мелодии, когда каждому слогу стихотворного ритма  $R_{ct}$  соответствует одна и только одна длительность ритма  $R_n$ .

Покажем, что при заданном стихотворном ритме (5.25) и заданной длине ритмического затаакта, совпадающего с инвариантным затаактом темы, с учетом естественных свойств синтаксической структуры массовой песни, песенный ритм  $R_n$  определяется однозначно.

Для массовой песни наиболее характерны простые масштабно-тематические структуры восьмитактового музыкального периода, в форме которого сочиняется мелодия. Эти структуры, в частности, предусматривают организацию повторности ритмических и мелодических фигур и расчленения мелодии на четырехтактовые предложения, двухтактовые фразы и однотактовые мотивы, характеризующие масштабную структуру  $S_N$ . К числу наиболее простых масштабных ( $S_N$ ) и ритмических ( $S_R$ ) структур массовой песни относятся следующие:

$$\begin{aligned} S_{N1} &= 2 + 2 + 4, \quad S_{N2} = 2 + 2 + 2 + 2, \\ S_{N3} &= 2 + 2 + 1 + 1 + 2, \quad S_{N4} = 1 + 1 + 2 + 1 + 1 + 2; \\ S_{R1} &= 1 1 1 1, \quad S_{R2} = 1 1 2 2, \quad S_{R3} = 1 2 2 1, \\ S_{R4} &= 1 2 1 2. \end{aligned} \quad \left. \right\} \quad (5.26)$$

Анализ песенного ритма  $R_n$  вариации начнем с рассмотрения третьей двухтактовой фразы, поскольку она соответствует третьей строке стихотворного ритма (5.25) с наибольшим (16) числом слогов.

$R_{ct3}$  : - $\text{U}$ .

Примём восьмую за минимально допустимую длительность ритма; тогда последовательность длительностей, отвечающая строке  $R_{ct3}$ , определяется однозначно, так как выполняется условие единственности песенного ритма (Р. Х. Зарипов, 1971а). При этом каждому слогу из  $R_{ct3}$  отвечает одна и только одна длительность  $\text{J}$ , а все длительности сгруппированы в пары

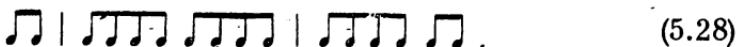


где каждая пара длительностей соответствует паре ударного и безударного слогов.

Поскольку одна строка стихотворного ритма соответствует двум тактам ритма  $R_n$ , представление (5.27) определяет выбор единственного возможного тактового размера  $4/4$  из двух наиболее простых и допустимых в программе  $3/4$  и  $4/4$ .

Для строки типа  $R_{ct3}$  (с началом - $\text{U}$ - $\text{U}$ -...) возможны два типа затаакта:  $\sigma_{\text{зат}1}^*$  (нулевой затаакт) и  $\sigma_{\text{зат}2}^*$  (затаакт из двух нот, причем первая расположена на более сильной доле такта)\*). Нулевой затаакт в нашем случае непригоден, поскольку затаакт в исскомом ритме  $R_n$ , как и в ритме исходной мелодии  $K_0$ , должен быть ненулевым. Остается одна возможность —  $\sigma_{\text{зат}2}^*$ , которому отводится пара длительностей строки (5.27), соответствующая первой паре слогов —  $\text{U}$  строки  $R_{ct3}$ .

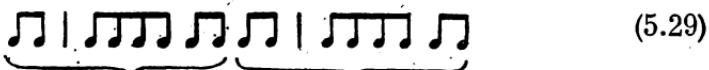
Таким образом, в исскомом ритме  $R_n$  ритмическая фигура третьей двутактовой фразы  $R_{n3}$ , соответствующая третьей строке  $R_{ct3}$  исходного стихотворного ритма (5.25), имеет вид



Стремясь к наибольшей простоте структуры мелодии, свойственной массовой песне, и исходя из вида (5.25) стихотворного ритма  $R_{ct}$ , убеждаемся, что наиболее простым и, следовательно, наиболее пригодным значением масштабной структуры  $S_N$  из (5.26) является  $S_{N3} = 2 + 2 + 1 + 1 + 2$ . При этом третья двутактовая фраза  $R_{n3}$  в песенном ритме  $R_n$  дробится на два однотактовых

\* ) Подробнее см. Р. Х. Зарипов (1971а).

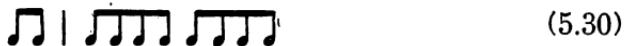
мотива  $(1+1)$ . Ритм  $R_{n_3}$  (5.28) такую возможность допускает и переписывается следующим образом:



Фигурные скобки внизу показывают дробление двутактовой фразы на однотактовые мотивы.

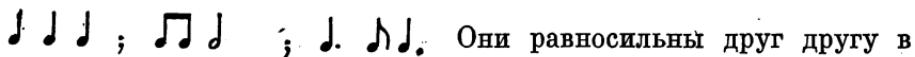
Наиболее простой ритмической структурой из перечня (5.26) будет  $S_{R_1} = 1\ 1\ 1\ 1$ . Покажем, что для нашего случая она пригодна.

В стихотворном ритме  $R_{ct}$  (5.25) строки 1, 2 и 4 содержат одинаковое количество слогов — 13, а строка 3 — 16 слогов. Кроме того, все четыре строки сходны между собой. При дроблении двутакта по формуле  $(1+1)$  в соответствии с масштабной структурой  $S_{N_3}$  песенный ритм соответствующего двутакта  $R_{n_3}$ , состоит из двух одинаковых однотактовых ритмических фигур (5.29). В силу ритмической структуры  $S_{R_1} = 1\ 1\ 1\ 1$ , ритмы первых тактов (с затахтом) во всех четырех двутактах  $R_{n_i}$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) должны полностью совпадать между собой. Но для  $R_{n_3}$  ритм первого такта (с затахтом) известен и имеет вид



Поэтому, исходя из того, что все четыре строки ритма  $R_{ct}$  сходны между собой, заключаем, что такой же вид (5.30) имеет и ритм первого такта (с затахтом) каждого из остальных двутактов  $R_{n_i}$  ( $i = 1, 2, 4$ ). Десять длительностей этой ритмической фигуры соответствуют десяти первым слогам строки  $R_{ct_i}$  ( $i = 1, 2, 4$ ). На оставшиеся три последних слога —  $\text{—}\text{—}$  из 13 приходятся лишь три четверти второго такта двутакта  $R_{n_i}$  ( $i = 1, 2, 4$ ), поскольку четвертая четверть занята затахтом. (Во всех построениях мелодии ритмическая фигура, составляющая затахт, является постоянной.)

Для последовательности слогов —  $\text{—}\text{—}$  возможны такие значения ритмической фигуры длиной в три четверти:



отношении метрических акцентов, и поэтому мы выбираем наиболее простое — первое значение и помещаем его во второй такт ритмических двутактов  $R_{n_i}$  ( $i = 1, 2, 4$ ).

Таким образом, искомый песенный ритм  $R_n$ , соответствующий исходному стихотворному ритму  $R_{ct}$  (5.25), имеет вид:



При анализе способа получения песенного ритма  $R_p$  обнаруживается, что во многих случаях выбирался наиболее простой вариант из возможных. По-видимому, в этом проявляется принцип простоты, лежащий, как отмечалось выше, в основе массовой песни. Композиторы используют его неосознанно, выражая тем самым свое стремление удовлетворить вкусам массового потребителя.

Таким образом, по заданным  $R_{ct}$  и затакту темы определены тактовый размер — 4/4 и песенный ритм  $R_p$  (5.31). Они вместе с мелодией «По Дону гуляет...» являются исходными данными для получения искомой мелодии «Молодежной».

Рассмотрим теперь, как преобразуется тема мелодии песни «По Дону гуляет...» в вариацию — мелодию песни «Молодежная».

При машинном варьировании темы  $K_0$  для заданного ритма  $R_p$  было получено несколько различных вариантов мелодической линии искомой мелодии  $K_v$ , соответствующих разным наборам значений параметров, влияющих на формирование программы и выбор подмножества закономерностей и средств композиции из множества предусмотренных в программе. Кроме того, и при одном и том же наборе возможны разные варианты выбора некоторых элементов композиций (например, высоты ноты) за счет использования датчика случайных чисел. Одна из полученных таким образом вариаций совпадает с мелодией песни И. Дунаевского «Молодежная» полностью (за исключением лишь одной ноты — первой ноты последнего такта). Будем называть эту мелодию «Молодежной». Мелодию песни «По Дону гуляет...» будем называть *темой* и обозначать через  $K_0$  (на рис. 5.10 она записана в строке 1).

Покажем теперь, как на последовательных этапах варьирования темы получались мелодические элементы, составляющие «Молодежную». Результаты этих промежуточных этапов изображены на рис. 5.10. Одновременно иллюстрируя возможности алгоритма, будем рассматривать и другие варианты мелодических фигур, полученные при тех же начальных данных.

1) На первом этапе устанавливаем, что тактовые размеры темы  $t_0$  и вариации  $t_v$  не совпадают между собой:  $t_0 = 3$ ,  $t_v = 4$ . В этом случае следует привести тему к рабочему виду (см. § 5.1), удобному для дальнейших преобразований. Прежде всего это относится к переносу инвариантов мелодической линии темы в вариацию.

Рабочий вид темы показан в строке 2 рис. 5.10. Он представляет собой развертывание мелодии в непрерывную мелодическую линию с шагом дискретности, равным минимально допустимой длительности — шестнадцатой.

2) На следующем этапе деформируется метр — метрическая координатная сетка вместе с наложенным на нее ритмом темы. Это делается для обеспечения возможности наложения мелодии темы на ритм вариации  $R_b$  таким образом, чтобы соответствующие тактовые черты их совпадали, а также для последующего вертикального переноса инвариантов мелодической линии темы на ритм вариации. Преобразование метра производится в соответствии со структурой метропреобразования  $S_{mp} = s_0s_1\dots s_i\dots s_8$ . Для «Молодежной»  $S_{mp} = 1\ 1\ 3\ 1\ 3\ 3\ 3\ 1$ .

Так как  $t_0 = 3$ , а  $t_b = 4$ , то в каждом такте три четверти ритма  $K_b$  растягиваются на четыре четверти. Это показано в строке 3 рис. 5.10. В соответствии со структурой  $S_{mp}$  в  $i$ -м такте  $s_i$ -я четверть первого метра (строка 2 рис. 5.10) растягивается на  $s_i$ -ю и  $(s_i + 1)$ -ю четверти второго метра (строка 3). Остальные доли такта остаются без изменений. Соответствие долей такта, установленное структурой  $S_{mp}$ , показано в строке 3. Для наглядности в строке 4 деформированная мелодия темы записана не в рабочем, а в обычном виде в тактовом размере 4/4, в который она метропреобразована.

3) Далее производится выделение стержневых нот и присвоение им признака СТ. В нашем случае признак СТ присваивается некоторым нотам темы  $K_b$  следующим образом: в тактах 0, 1, 2, 3, 4 — всем нотам темы  $K_b$ , в остальных тактах — лишь первой ноте каждого такта. Напомним, что в строке 5 рис. 5.10 точки помещены на месте нот метропреобразованной темы  $K_b$  из строки 4 с признаком СТ. Они соответствуют определенным длительностям ритма  $R_b$  (см. строку 6), расположенным по вертикали ниже.

4) Следующий этап — вертикальный перенос инвариантов мелодической линии темы.

В строке 6 рис. 5.10 записан ритм  $R_b$  вариации, являющийся одновременно песенным ритмом  $R_n$ . Обозначим через  $R'_0$  ритм мелодии, записанной в строке 4, появляющийся в результате деформации ритма  $R_0$  при метропреобразовании. Как видно из сравнения строк 4 и 6, ритм  $R_b$  представляет собой простое дробление ритма  $R'_0$ . Иначе говоря, каждая длительность ритма  $R'_0$ , деформированная при метропреобразовании, делится в  $R_b$  на  $n$  частей ( $n = 1, 2, \dots$ ).

Дробление первоначального ритма — наиболее простой случай получения ритма вариации и в то же время наиболее удобный для осуществления операции вертикального переноса инвариантов мелодической линии темы  $K_b$  с деформированным ритмом  $R'_0$  на ритм  $R_b$ . Здесь для каждой ноты из  $R'_0$  выполняется следующее усло-

вие: ноте из  $R_0$  с координатой начала  $m_0$  всегда соответствует нота из  $R_b$  с той же координатой  $m_0$  начала.

В строке 7 показан результат вертикального переноса высот  $W_{ct}$ , отмеченных признаком СТ, из строки 3 на ритм  $R_b$  (строка 6). Стержневые высоты  $W_{ct}$ , взятые из темы  $K_0$  (строка 3), называются на соответствующие длительности ритма  $R_b$  в строке 6. Эта операция и ее схематическое изображение на рис. 5.10 наглядно показывают сущность вертикального переноса. Межвысотные ноты в строке 7 показаны вертикальными палочками (штилями), обозначающими длительности.

5) В строке 8 рис. 5.10 приведен результат  $K'_b$  следующего этапа варьирования — заполнения высотами  $W_{1b}$  межвысотных нот. На этом этапе производится заполнение интервала между каждой парой  $W_1$  и  $W_2$  ближайших инвариантных высот  $W_{ct}$ , расположенных в строке 7.

Возможны разные способы такого заполнения, которые при некоторых условиях ведут к образованию константы вариации и влияют на эмоциональный характер результирующей мелодии.

Константа вариации получается при использовании какого-либо одного способа заполнения, в результате которого образуется одна и та же мелодическая фигура, расположенная в определенных местах мелодии. Например, на первых долях такта в начале каждой фразы; на нотах, образующих последовательность «затакт — сильная доля такта» и т. п. Мелодические фигуры, полученные при этом, регулярно повторяясь в последовательных построениях на одних и тех же долях, производят такое же воздействие при восприятии, как и повторность — точная или видоизмененная. Повторяясь в мелодии, константа как бы определяет «лицо» мелодии, ее характерную особенность, эмоциональную направленность. Степень эмоционального влияния константы (при прочих равных условиях) зависит от последовательности ее проведения в композиции. В мелодии возможно и явление поликонстантности — проведение нескольких констант сразу. Как будет показано дальше, в «Молодежной» наиболее четко выявлены две разные константы.

При заполнении разных пар стержневых высот в мелодии могут быть использованы разные способы. Все запрограммированные способы заполнения и их модификации сводятся к двум основным:

I. Межвысотные ноты  $W_{1b}$ , расположенные между  $W_1$  и  $W_2$ , приобретают значение  $W_1$  первой инвариантной ноты из пары  $W_1, W_2$ , т. е.  $W_{1b} = W_1$ ,  $b = 1, 2, \dots$

II. Высоты  $W_{1b}$  заполняют весь промежуток между нотами  $W_1, W_2$  и выбираются так, чтобы соседние не были равны ( $W_{1b-1} \neq W_{1b}$ ). Кроме того, интервалы между этими высотами должны быть минимальными, а число перемен направления движения высот  $W_{1b}$  — наименьшим.

В строке 8 рис. 5.10 показан результат реализации способа I, когда все межвысотные ноты удовлетворяют условию  $W_{1b} = W_1$ .

На этом этапе высоты присваиваются не всем межвысотным нотам, а лишь некоторой их части. При этом происходит формирование константы  $C_b$ , что осуществляется следующим образом.

В первых двух фразах имеет место двукратное проведение мелодической фигуры. СТ-нота  $W_1$  и примыкающие к ней межвысотные ноты  $W_{1b}$  расположены в первых трех долях первого такта двутактовой фразы, заполняя эти три доли целиком, причем все ноты, расположенные в них, имеют одну и ту же высоту  $W_1$ . Таким образом, способ I, реализованный в тактах 1 и 3 и затем продолженный в последующих тактах, образует константу вариации — мелодическую фигуру, представляющую собой последовательность одновысотных нот, расположенных в первых трех долях такта (или в первых  $t_b - 1$  долях такта).

Двукратное проведение мелодической фигуры — это уже константа. При большем числе проведений она производит больший эффект и звучит убедительнее, оказывая при восприятии такое же действие, как и повторность (см. § 5.3). Возможно проведение сформированной константы и в последующих тактах. Этому способствует и характерная особенность массовых песен: при сочетании структур  $S_{N3} = 2+2+1+1+2$  и  $S_{R1} = 1\ 1\ 1\ 1$  такты 5 и 6 (где двутактовая фраза дробится на однотактовые мотивы по формуле  $1+1$ ) имеют сходное мелодическое строение (однотактовые секвенционные мотивы). Перенося константу, образованную в тактах 1 и 3, в такты 5, 6 и 7, получаем в них неполное заполнение межвысотных нот: заполняются лишь ноты первых трех долей (см. строку 8 рис. 5.10).

При формировании и реализации константы важно заметить ее появление вначале, а затем уже проводить ее сознательно. Композитор, вероятно, это делает неосознанно, исходя из интуитивной потребности к повторности некоторой музыкальной фигуры, обладающей свойствами константы. Программа должна уметь обнаружить зарождение константы (посредством анализа синтезированной части) и осуществить ее проведение в оставшейся части мелодии. При этом все действия, все операции, трансформирующие мелодию, фиксируются машиной и весь механизм порождения мелодии может быть восстановлен. Последнее обстоятельство необходимо для анализа.

Оставшиеся незаполненными межвысотные ноты в тактах 5, 6 и 7 (строка 8) можно также заполнить либо способом I, либо одной из модификаций способа II. Теперь функции нот  $W_{ct}$  ( $W_1$  и  $W_2$ ) выполняют пары высот, окаймляющие оставшиеся незаполненными межвысотные ноты. Возможность заполнения разными способами в тактах 5, 6 и 7 позволяет сформировать еще одну константу, поскольку все незаполненные межвысотные ноты расположены на одной — четвертой доле такта.

Анализируя движение нот, расположенных в тактах 1 и 3 в одном и том же месте — на 4-й доле первого такта каждой из двухтактовых фраз, — можно заметить следующую закономерность. Направление движения высот, образующих последовательность «затактовая нота — сильная доля такта» (предыкт — икт) на границе тактов 1 — 2 и 3 — 4, постоянно. Затактовая нота снизу подходит к сильной доле следующего такта. Такое расположение двух соседних нот, разделенных тактовой чертой, является второй константой, которая может быть реализована при заполнении оставшихся межвысотных нот в тактах 5, 6 и 7.

В этих трех тактах межвысотные ноты расположены непосредственно перед тактовой чертой. Поэтому второе условие второй константы выполнено. Покажем возможность выполнения первого условия и, следовательно, возможность реализации второй константы в этих тактах.

Легко видеть, что способ I для этого не годится. Рассмотрим заполнение способом II в тактах 5 и 6. При различных модификациях этого способа образуются и различные мелодические фигуры, связывающие ближайшие ноты  $W_{ct}$  и относящиеся к ним межвысотные.

Посмотрим, как получается мелодическая фигура, заполняющая межвысотные ноты в такте 5. Применим способ II и обозначения § 5.2; имеем  $W_1 = 26$ ,  $W_2 = 25$ ,  $m = 2$ ,  $\varphi = W_2 \ominus W_1 = -1$ ,  $q = |\varphi| = 1$ . Поскольку  $m > q$ , используется случай IIб). Находим значение  $a = \left[ \frac{m+2-q}{2} \right] = \left[ \frac{2+2-1}{2} \right] = \left[ \frac{3}{2} \right] = 1$ , откуда  $m_1 = m - a = 1$ ,  $q_1 = q + a = 2$ .

Далее переходим к процедуре отыскания интервалов способом IIa), поскольку  $m_1 < q_1$  ( $1 < 2$ ). Подставляя значения  $m_1$  и  $q_1$  в соотношение (5.17), приобретающее вид

$$q_1 = (m_1 + 1)f + d, \quad (5.32)$$

находим значения  $f$  и  $d$ :  $2 = (1 + 1)f + d$ , т. е.  $f = 1$ ,  $d = 0$ .

Отыскиваем значения интервалов  $\varphi$  последовательности (5.16): всего в этой последовательности имеется  $m + 1$  интервалов, из них  $a$  интервалов равны  $-1$  sign  $\varphi = -\text{sign}(-1) = 1$ . Остальные интервалы (их  $m_1 + 1 = m + 1 - a$ ) равны между собой:  $f = -1$ . Получаем искомую последовательность интервалов (5.18):

$$\frac{1}{a}, \quad \underbrace{-1, -1}_{m-a+1}.$$

Для такта 5 искомая последовательность высот (5.15) составляет мелодическую фигуру, имеющую в числовом коде вид

$$26, 27, 26, 25. \quad (a)$$

В описании способа IIб) (см. § 5.2) предусмотрена модификация этой мелодической фигуры, для чего найденные интервалы на-

до расположить в обратном порядке:

$$\underbrace{-1, -1}_{m-a+1}, \quad \frac{1}{a}.$$

Получаем модифицированную мелодическую фигуру

$$26, 25, 24, 25. \quad (6)$$

Для такта 6 межвысотные ноты заполняются таким же способом. Здесь  $W_1 = 25$ ,  $W_2 = 24$ . Все же остальные значения, включая и последовательности интервалов (5.16), совпадают с полученными для такта 5. Запишем искомые мелодические фигуры в числовом виде:

$$25, 26, 25, 24. \quad (a')$$

$$25, 24, 23, 24. \quad (b')$$

Для наглядности на рис. 5.22 изображены схемы движения мелодических фигур (а) и (б) (или (а') и (б')) с сохранением их внутренних интервальных отношений.



Рис. 5.22. Варианты заполнения межвысотных нот значениями высот в тактах 5 и 6 строки 8 рис. 5.10.

Как мы видим, условиям реализации второй константы удовлетворяет мелодическая фигура вида (б). Она и помещается в тактах 5 и 6.

Для проведения второй константы в такте 7 способ IIб) не годится по следующей причине. При заданных  $W_1 = 24$ ,  $W_2 = 21$  и количестве нот между ними  $m = 2$  видно, что заполнение реализуется способом IIа) однозначно (здесь  $q = 3$ , и поэтому  $m < q$ ). Получающаяся мелодическая фигура (см. рис. 5.22, в) не удовлетворяет первому условию появления константы, которое предусматривает движение снизу вверх.

Чтобы удовлетворить этому условию, пожертвуем проведением первой константы в такте 7, оставив в нем лишь первую ноту как инвариантную (см. строку 7 рис. 5.10). Получаем в строке 9 мелодию с незаполненными межвысотными нотами в тактах 5, 6, 7.

Мелодическая фигура, заполняющая межвысотные ноты в такте 7, получается следующим образом. Находим необходимые значения:

$$W_1 = 24, \quad W_2 = 21, \quad m = 7, \quad \varphi = W_2 \ominus W_1 = -3, \quad q = |-3| = 3,$$

$$a = \left[ \frac{m+2-q}{2} \right] = \left[ \frac{7+2-3}{2} \right] = 3, \quad m_1 = m - a = 4, \quad q_1 = q + a = 6.$$

Подставляя  $m_1 = 4$  и  $q_1 = 6$  в формулу (5.32):

$$q_1 = (m_1 + 1)f + d,$$

получаем  $6 = 5f + d$ , откуда  $f = 1$ ,  $d = 1$ . Отсюда последовательность  $m + 1 = 8$  интервалов (5.16) располагается следующим образом:

$$\begin{array}{c} +1, +1, +1, \quad -2, \quad -1, -1, -1, -1 \\ | \quad | \\ a \quad d \quad m+1-a-d \\ \hline m_1+1 \end{array} \quad (\text{aa})$$

В соответствии с описанием способов IIа) и IIб) (см. § 5.2) получаем модификацию последовательности интервалов (5.16):

$$\begin{array}{c} +1, +1, +1, \quad -1, -1, -1, -1, \quad -2 \\ | \quad | \quad | \quad | \quad | \quad | \\ a \quad m+1-a-d \quad d \\ \hline m_1+1 \end{array} \quad (\text{бб})$$

Для получения следующей модификации интервалы в последовательностях (аа) и (бб) следует располагать в обратном порядке либо, что то же, отсчитывать (аа) и (бб) не от  $W_1$ , а от  $W_2$ , но с обратными знаками. В этом случае последовательность (5.16) приобретает следующий вид:

$$\begin{array}{c} -1, -1, -1, -1, \quad -2, \quad +1, +1, +1 \\ | \quad | \quad | \quad | \quad | \quad | \\ m+1-a-d \quad d \quad a \\ \hline \end{array} \quad (\text{вв})$$

$$\begin{array}{c} -2, \quad -1, -1, -1, -1, \quad +1, +1, +1 \\ | \quad | \quad | \quad | \quad | \quad | \\ d \quad m+1-a-d \quad a \\ \hline \end{array} \quad (\text{гг})$$

Теперь искомую последовательность высот (5.15) получим по формуле  $W_{1b} = W_{1b-1} \oplus \Phi_b$ ,  $b = 1, 2, \dots, m + 1$ .

Выпишем четыре последовательности высот межвысотных нот (5.15), полученных соответственно для последовательностей интервалов (аа), (бб), (вв), (гг) в числовом коде:

$$24, 25, 26, 27, 25, 24, 23, 22, 21, \quad (\text{аа}')$$

$$24, 25, 26, 27, 26, 25, 24, 23, 21, \quad (\text{бб}')$$

$$24, 23, 22, 21, 17, 15, 16, 17, 21, \quad (\text{вв}')$$

$$24, 22, 21, 17, 16, 15, 16, 17, 21. \quad (\text{гг}')$$

В нотной записи эти последовательности высот представлены на рис. 5.23. Таким образом, при заполнении нот в такте 7 можно получить несколько различных вариантов мелодической фигуры, четыре из которых изображены на рис. 5.23.

Условиям появления второй константы удовлетворяют две мелодические фигуры (вв) и (гг). Какую же из них выбрать для такта 7?

Анализируя эти фигуры с точки зрения их гармонической структуры, замечаем в (вв) преимущественное преобладание более сильных нот (расположенных на более сильных долях такта), образующих разложение доминантсептаккорда (*фа, ре, си, соль*). Но тakt 7 темы  $K_0$  имеет такую же гармоническую последовательность нот: *фа, ре, соль* (см. строку 1 рис. 5.10). Таким образом, выбрав мелодическую фигуру (вв) для нашей мелодии, мы получим для вариации  $K_v$  еще один (уже гармонический) инвариант. Следовательно, наиболее приемлемым является вариант мелодической фигуры (вв) рис. 5.23.



Рис. 5.23. Варианты мелодических фигур, заполняющих интервал между инвариантными высотами в такте 7 строки 9 рис. 5.10.

6) Результатом заполнения всех межвысотных нот, как и результатом варьирования темы, служит строка 10 рис. 5.10.

Как видно из описания этапов преобразования темы  $K_0$ , полученная вариация («Молодежная») является одним из нескольких возможных вариантов, предложенных машиной.

## ГЛАВА 6

### ВАРИАЦИИ В КОМБИНАТОРНОЙ ИГРЕ

---

Выше был рассмотрен один вид творчества — деятельность композитора при сочинении песенных мелодий и было показано, что основным является поиск вариантов по некоторым специфическим правилам, поддающимся моделированию с помощью программы для ЭВМ.

Было показано (см. § 2.5), что плетение кружев — также творческая деятельность — тоже в значительной степени сводится к поиску различных вариантов, ограниченных исходным набором простых закономерностей.

К разновидностям творческой деятельности относится и эвристическая деятельность по решению задач. Широко используемым инструментом для ее исследования являются так называемые комбинаторные игры. Попытаемся показать, что и этот вид деятельности по существу тоже сводится к поиску вариантов. Рассмотрим одну из комбинаторных игр, которая наиболее часто используется в психологических экспериментах, а именно игру в 5.

#### § 6.1. Игра в 5 — инструмент при исследовании эвристической деятельности

*Комбинаторные игры как объект психологических экспериментов. Игра в 5 — упрощенный вариант игры в 15. Теория разрешимости игры. Построение структуры решения для игры в 5.*

Существует определенный класс игр-головоломок. Одна из них — знаменитая игра в 15, разработанная лет сто назад Сэмом Лойдом (рис. 6.1). Игры этого класса обычно выглядят так. На прямоугольной доске с  $m \times n$  полями расположено  $m \times n - 1$  фишек. Для игры в 15 значения  $m$  и  $n$  совпадают между собой и равны 4; отсюда 15 получается так:  $15 = 4 \times 4 - 1$ . Одно пустое поле — поле без фишк — позволяет перемещать фишки, не поднимая их с доски. Задача состоит в том, чтобы путем передвижения фишек расположить их в определенном заранее установленном порядке.

Имеются упрощенные варианты игры в 15 (рис. 6.2) — игра в 8 (для этой игры  $m = n = 3$ , а  $8 = 3 \times 3 - 1$ ) и игра в 5 ( $m = 2$ ,  $n = 3$ , а  $5 = 2 \times 3 - 1$ ).

Комбинаторные игры (такие, как шахматы, шашки, домино, нарды, игра в 15 и др.) используются в различных психологиче-

ских экспериментах, проводящихся для выявления закономерностей мышления и восприятия. Большое распространение получила игра в 5, впервые использованная в психологических экспериментах В. Н. Пушкиным (В. Н. Пушкин, 1965; Д. Н. Завалишина, 1968; Ю. И. Клыков, Т. К. Рыбакова, 1967; Д. А. Поспелов, В. Н. Пушкин, 1972 и др.).

1	2	3	4
5	6	7	8
9	10	11	12
13	14	15	

а)

Рис. 6.1. Игра в 15.

2	5	8
7		3
4	1	6

а)

Рис. 6.2. Упрощенные варианты игры в 15 — игра в 8 (а) и игра в 5 (б).

Эта игра привлекает внимание исследователей простотой правил игры, малым числом элементов, и является удобным инструментом психологического изучения эвристической деятельности.

Известно много публикаций, посвященных игре в 15 (например, Э. Люкас, 1924; Г. Шуберт, 1923; С. Бобров, 1946; М. Гарднер, 1971; 1972; 1974; О. Т. Долгов, 1974; Н. Я. Виленкин, 1975 и др.). Авторы многих работ рассматривают математическую теорию этой игры, имея в виду на самом деле лишь теорию разрешимости игры в 15, т. е. математически строгое решение вопроса, при каком взаимном расположении фишек на доске данная задача разрешима, а при каких решение получить нельзя. Эта теория доказывает, что можно перевести любую разрешимую позицию посредством некоторого конечного числа ходов в искомую позицию, однако она либо вовсе не указывает, как добиться цели, либо не дает способа добиться цели скорейшим путем. Иначе говоря, структура отыскания кратчайшего решения игры в 15, насколько нам известно, до сих пор не разработана. В настоящей главе эта задача решается для игры в 5.

Предварительно игра анализируется и уточняются определения элементов игры. На основе выявленной структуры задач и их классификации строится схема решения игры в 5, минимизирующая число затрачиваемых ходов. Решение сводится не к последовательности ходов, а к более сложным элементам — последовательности двух приемов, порождающих однозначную структуру решения для каждого из шести выявленных типов задач. Рас-

сматриваются вопросы разрешимости игры. На материале игры в 5 устанавливаются общие закономерности механизма транспозиции (переноса) инвариантных элементов как компонента эвристической деятельности.

## § 6.2. Правила игры

*Элементы игры в 5 и определение понятий.*

Рассмотрим элементы игры в 5.

Доска (рис. 6.3) состоит из шести полей, образующих две горизонтали (1-ю — верхнюю и 2-ю — нижнюю) и три вертикали (1-ю — левую, 2-ю — среднюю, 3-ю — правую). Перенумеруем поля — при пробегании полей по часовой стрелке, начиная с верхнего левого поля, номера полей возрастают от 1 до 6. Обозначим поля следующим образом —  $n1, n2, n3, n4, n5, n6$ .

$n1$	$n2$	$n3$
$n6$	$n5$	$n4$

Рис. 6.3. Доска с перенумерованными полями для игры в 5.

Выберем любые пять полей доски. На них расположим пять фишек с номерами 1, 2, 3, 4, 5 (обозначим их соответственно  $\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4, \phi_5$ ) в некотором произвольном порядке так, чтобы на каждом поле была одна и только одна фишечка. Шестое поле, на котором фишечки нет, назовем *пустым*. Такое расположение фишечек на доске будем называть *позицией*.

Примеры позиций:  $3\ 2\ 5\ 3\ 5\ 1\ 2\ 3$   
 $1\ 4\ ,\ 2\ 1\ 4\ ,\ 4\ 5$

*Конечной позицией* назовем такую позицию, в которой фишечки расположены в некотором определенном, фиксированном, заранее известном порядке. Конечную позицию, в которой  $n6$  — пустое поле, а в оставшихся полях фишечки расположены в таком порядке:  $1\ 2\ 3$ ,

$4\ 5$ , будем называть *стандартной конечной позицией*. В дальнейшем, если это не оговаривается особо, под конечной позицией будем иметь в виду стандартную конечную позицию.

Позицию, с которой начинается игра, будем называть *начальной позицией*. Условимся, что в начальной позиции пустое поле совпадает с пустым полем в конечной позиции.

Пример начальной позиции:  $3\ 2\ 1\ ,\ 5\ 4\ .$

Два поля будем называть *соседними*, если они расположены либо на одной вертикали, либо на одной горизонтали в непосредственной близости друг от друга (не разделены промежуточным полем).

Ходом фишки назовем элементарную операцию передвижения фишки на соседнее пустое поле. Следовательно, право хода имеют лишь фишки, стоящие на полях, соседних с пустым полем.

Ход фишкой  $\phi r$  на соседнее пустое поле назовем ходом  $\phi r$ . Последовательность ходов будем обозначать перечнем фишек с указанием их номеров, например —  $\phi 1, \phi 2, \phi 4$ . Эта тройка ходов приводит позицию  $4\overset{13}{2}5$  к стандартной конечной позиции  $4\overset{123}{5}$ . Поскольку в любой позиции имеется по определению только одно пустое поле, такое обозначение ходов однозначно.

Целью игры в 5 является преобразование данной начальной позиции в конечную позицию посредством некоторой последовательности ходов. Процесс преобразования начальной позиции в конечную будем называть решением начальной позиции или *решением задачи*.

### § 6.3. Анализ решений. Приемы решения

*Машиноориентированный анализ процесса решения для выявления закономерностей и структуры решения. Вращение по большому кругу. Каноническая циклическая последовательность. Неподвижная, фиксированная вертикаль. Вращение по малым кругам. Кодирование решения.*

Для выявления закономерностей игры в 5 проанализируем решения разных задач. Задачи сгруппированы в шести сериях так, что трудность решения их увеличивается от серии к серии. При этом выявляются приемы решения, которые для одной и той же серии одинаковы и строго упорядочены. Задачи нумеруются двузначными числами: первая цифра обозначает номер серии, а вторая — номер примера в серии.

Задача 11. Перевести начальную позицию  $4\overset{12}{5}3$  в конечную позицию  $1\overset{23}{4}5$ .

Решение: на пустое поле двигаем фишку  $\phi 4$  и получаем позицию  $1\overset{2}{4}53$ , затем — фишку  $\phi 1: 4\overset{12}{5}3$ , фишку  $\phi 2: 4\overset{123}{5}$ ,  $\phi 3: 4\overset{123}{5}$ ,  $\phi 5: 1\overset{23}{4}5$ ,  $\phi 4: 1\overset{235}{4}$ . Получаем конечную позицию за 6 ходов.

Короче процедуру решения можно записать так: начальную позицию  $4\overset{12}{5}3$  приведем к конечной позиции  $1\overset{23}{4}5$  за 6 ходов —  $\phi 4, \phi 1, \phi 2, \phi 3, \phi 5, \phi 4$ .

Задача 12  $1\overset{235}{4}$  решается также за 6 ходов —  $\phi 1, \phi 4, \phi 5, \phi 3, \phi 2, \phi 1$ .

В обоих случаях фишки передвигались как бы вращением по кругу, образованному всеми полями доски: в задаче 11 против

часовой стрелки (влево, или в отрицательном направлении), а в задаче 12 — по часовой стрелке (вправо, или в положительном направлении). Такое перемещение будем называть *вращением по большому кругу — влево* (рис. 6.4, а) или *вправо* (рис. 6.4, б).

**Задача 13** <sup>3 5 4</sup> <sub>2 1</sub> решается вращением по большому кругу вправо за 12 ходов, а влево — за 18 ходов. Таким образом, одну и ту же задачу можно решить за разное число ходов. В связи с этим возникает проблема минимизации — отыскания такого решения, которое осуществлялось бы за наименьшее возможное число ходов.

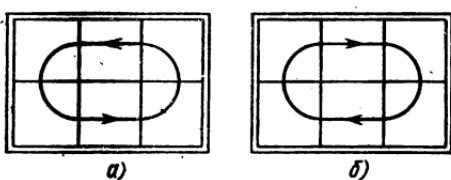


Рис. 6.4. Вращение по большому кругу влево (а) и вправо (б).

Очевидно, что таким способом получаются 5 различных начальных позиций. Они образуют (пустое поле не учитывается) циклическую последовательность номеров фишек 1, 2, 3, 5, 4, расположенных на большом круге по часовой стрелке — т. е. последовательность 1 2 3 5 4 1 2 3 5 4 1 2 ..., которую назовем *канонической циклической последовательностью* (рис. 6.5), или короче — КЦП.

**Задача 21** <sup>4 1 3</sup> <sub>2 5</sub>. Вращением по большому кругу вправо или влево эта задача не решается, так как начальная позиция не образует канонической циклической последовательности. Решим ее следующим образом. Тремя ходами —  $\phi 4$ ,  $\phi 1$ ,  $\phi 2$  — получаем позицию <sup>1 2 3</sup> <sub>4 5</sub> с канонической циклической последовательностью. Ходом  $\phi 4$  приводим ее к конечной позиции. Задача решена за 4 хода.

**Задача 22** <sup>5 4 2</sup> <sub>1 3</sub>. Позиция не образует канонической циклической последовательности. Однако к ней приводят три хода —  $\phi 5$ ,  $\phi 4$ ,  $\phi 1$  — <sup>4 1 2</sup> <sub>5 3</sub>. Эту позицию вращением по большому кругу влево приводим к конечной за семь ходов —  $\phi 5$ ,  $\phi 4$ ,  $\phi 1$ ,  $\phi 2$ ,  $\phi 3$ ,  $\phi 5$ ,  $\phi 4$ . Задача решена за 10 ходов.

Ту же задачу за 10 ходов решим по-другому. За 6 ходов —  $\phi 1$ ,  $\phi 4$ ,  $\phi 5$ ,  $\phi 1$ ,  $\phi 4$ ,  $\phi 5$  — приводим начальную позицию к канонической циклической последовательности <sup>1 2</sup> <sub>4 5 3</sub>, которую за 4 хода —  $\phi 2$ ,  $\phi 3$ ,  $\phi 5$ ,  $\phi 4$  — преобразуем к конечной позиции.

В решениях обеих задач (21 и 22) для приведения позиции к канонической циклической последовательности мы вращали фиш-

Нетрудно заметить, что в рассмотренных примерах начальные позиции могут быть получены из конечной позиции вращением по большому кругу.

ки по кругу, образованному полями  $n1, n2, n5, n6$ , влево или вправо. При этом фишки, расположенные на правой вертикали, оставались неподвижными. Такую вертикаль назовем *фиксированной вертикалью*.

Поля доски образуют *два малых круга*: левый — полями  $n1, n2, n5, n6$  (рис. 6.6, а) и правый — полями  $n2, n3, n4, n5$  (рис. 6.6, б). Вместо «малый левый круг» или «малый правый круг» будем для краткости говорить соответственно «левый круг» или

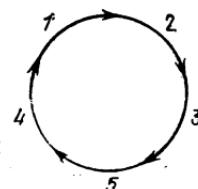


Рис. 6.5. Схема расположения номеров в канонической циклической последовательности.

«правый круг». Для правой вертикали левый круг будет противоположным малым кругом. Аналогично, для фиксированной левой вертикали правый круг будет противоположным кругом. Левый круг включает в себя поля левой, или 1-й вертикали, поэтому будем его еще называть 1-м кругом, правый же круг будем называть 3-м кругом.

Введем однозначный и наглядный способ кодирования решения, отражающий вид позиции, фиксированную вертикаль при вращении по малому кругу и число ходов с указанием направления.

Как видно, решение всегда сводится к вращению по большому или малым кругам. При вращении по большому кругу некоторой позиции (назовем ее исходной) будем записывать ее и рядом справа — число ходов под горизонтальной стрелкой, указывающей направление вращения. Запись вращения по малому кругу отличается тем, что в исходной позиции фиксированная вертикаль изображается вертикальной чертой, отделяющей эту вертикаль от противоположного малого круга. Тогда следующее за позицией число со стрелкой над ним указывает число ходов и направление вращения по малому кругу, противоположному фиксированной вертикали. Для примера запишем второе решение задачи 22:

$5\ 4\ 2 \xrightarrow{1} 2 \xleftarrow{4}$   
 $1\ 3\ 6\ 4\ 5\ 3\ 4$ .

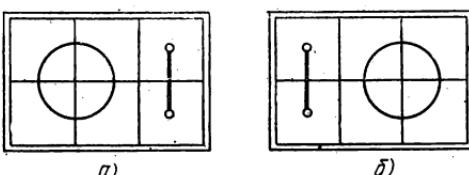


Рис. 6.6. Фиксированная вертикаль и противоположный малый круг.

Предложенный способ кодирования особенно удобен при записи решений более сложных задач, которые будут рассмотрены в следующих сериях.

В примерах серии 2 общее то, что к канонической циклической последовательности приводит вращение по (левому) *малому кругу* при фиксированной (неподвижной) крайней, противоположной этому кругу правой вертикали. В примерах этой серии существенно то, что фишкы, расположенные на фиксированной вертикали, являются соседними в циклической канонической последовательности  $\{123354\} = 12354123\dots$  (см. рис. 6.5). В примере 21 это  $\phi 3\phi 5$ , в примере 22 —  $\phi 2\phi 3$  (в правой вертикали).

Две соседние фишкы, последовательно расположенные в канонической циклической последовательности, будем называть *циклически соседними фишками*. Это пары фишек  $\phi 1\phi 2$ ,  $\phi 2\phi 3$ ,  $\phi 3\phi 5$ ,  $\phi 4\phi 1$ ,  $\phi 5\phi 4$  (но не  $\phi 4\phi 5$ ,  $\phi 2\phi 1$ ,  $\phi 1\phi 4$  и т. д.).

Из рассмотренных примеров уже можно заметить, что вращение по большому кругу сохраняет структуру позиции, ее внутренние связи. Так, вращая позицию, представляющую собой каноническую циклическую последовательность, по большому кругу, мы снова получаем позицию, образующую каноническую циклическую последовательность. Кроме того, вращение по большому кругу позволяет установить на определенном месте доски определенную фишку позиции: например, на некоторой крайней вертикали — определенную пару фишек.

При вращении же по малому кругу, напротив, внутренние связи позиции, ее первоначальная структура, вообще говоря, разрушаются — разрываются связи в тех горизонтальных парах фишек, одна из которых находится на крайней вертикали, а другая — на средней. Это мы и видели на примерах серии 2.

**Задача 31.**  $\begin{array}{c} 3 \ 4 \ 1 \\ 2 \ 5 \end{array}$ . Эта позиция не образует канонической циклической последовательности. Любое вращение по левому кругу при фиксированной правой вертикали к ней не приводит. Однако ход  $\phi 2$  приводит к позиции  $\begin{array}{c} 3 \ 4 \ 1 \\ 2 \ 5 \end{array}$ , сходной с позициями в задачах 21, 22. Фиксируя левую вертикаль, вращением по кругу вправо за 4 хода —  $\phi 5$ ,  $\phi 1$ ,  $\phi 4$ ,  $\phi 5$  — получаем каноническую циклическую последовательность, которую за 11 ходов вращением по большому кругу вправо приводим к конечной позиции. Вся задача решается за 16 ходов:

$$\begin{array}{r} 3 \ 4 \ 1 \rightarrow 4 \ 1 \rightarrow 3 \ 5 \ 4 \rightarrow \\ 2 \ 5 \ 1 \ 2 \mid 5 \ 4 \ 2 \ 1 \ 11. \end{array}$$

**Задача 32.**  $\begin{array}{c} 3 \ 5 \ 2 \\ 1 \ 4 \end{array}$ . Здесь пары фишек, стоящие в правой вертикали или в левой диагонали (образуемой полями  $n5n1$ ), не являются циклически соседними. Однако два хода —  $\phi 3$ ,  $\phi 5$  — приводят к позиции  $\begin{array}{c} 5 \ 2 \\ 3 \ 1 \ 4 \end{array}$ , где в левой вертикали стоит циклически соседняя пара  $\phi 3\phi 5$ . Это уже знакомая по предыдущей серии за-

дач структура позиции. Циклически соседнюю пару в вертикаль мы привели указанными ходами с горизонтали. Дальнейшее решение структурно совпадает с решениями задач серии 2:

$$\begin{array}{c|ccccc} 5 & 2 & \rightarrow & 5 & 4 & 1 \\ 3 & 1 & 4 & 5 & 3 & 2 \\ \hline & 13 & & & & \end{array}$$

Рассмотрим другое решение этой задачи. В нижней горизонтали начальной позиции имеется другая циклически соседняя пара —  $\phi 4\phi 1$ . Перенесем ее в правую вертикаль вращением по большому кругу влево —  $\phi 3, \phi 5, \phi 2, \phi 4, \phi 1: \begin{smallmatrix} 5 & 2 & 4 \\ 3 & 1 & \end{smallmatrix}$ . Дальнейшее решение нам знакомо:

$$\begin{array}{c} \vec{1} & 5 & 4 & \vec{1} \\ & 3 & 2 & 1 & 4 \\ \hline & & & & \end{array} \text{ (или } \overline{16}).$$

Всего в этом случае затрачено 20 (или 22) ходов.

Однако наиболее эффективным (в отношении числа ходов) будет такое решение, при котором с самого начала мы будем стремиться ставить пары фишек ближе к своим местам в конечной позиции. Так, если ту же горизонтально расположенную пару циклически соседних фишек  $\phi 4\phi 1$  поместить в левую вертикаль, эта задача решается за 12 ходов:

$$\begin{array}{c|ccccc} 3 & 5 & 2 & \rightarrow & 1 & 3 \\ 14 & 7 & 4 & & & 5 \\ \hline & 2 & 4 & 4 & 5 & 1 \\ & & & & & \end{array}$$

Этот пример показывает, что если в крайней вертикали нет пары циклически соседних фишек, но она есть в позиции (в ее циклической последовательности) в левой диагонали или на горизонтали, то вращением по большому кругу ее можно перенести в одну из крайних вертикалей. (В задаче 32 две таких пары —  $\phi 3\phi 5$  и  $\phi 4\phi 1$ ). В этом случае решение состоит из трех последовательных этапов: приведение этой пары в крайнюю вертикаль вращением по большому кругу, получение канонической циклической последовательности вращением по противоположному малому кругу, приведение к конечной позиции вращением по большому кругу. Для достижения решения за минимальное число ходов нужно обращать внимание на выбор соответствующей пары фишек, крайней вертикали и направления вращения.

**Задача 33**  $\begin{smallmatrix} 2 & 5 & 4 \\ 1 & 3 & \end{smallmatrix}$ . Запишем решение задачи в наших обозначениях:

$$\begin{array}{c|ccccc} 2 & 5 & 4 & \rightarrow & 2 & 3 \\ 13 & 1 & 1 & & & 2 \\ \hline & 3 & 5 & 1 & 4 & 5 \\ & & & & & \end{array}$$

**Задача 41**  $\begin{smallmatrix} 3 & 2 & 5 \\ 4 & 1 & \end{smallmatrix}$ . Позиция не образует канонической циклической последовательности, нет здесь и циклически соседних пар

фишек. Такую пару можно сформировать, разрушив установленные в позиции связи вращением по малому кругу. Для этого, фиксируя правую вертикаль, вращаем фишку по левому кругу до тех пор, пока на горизонтали не получится циклически соседняя пара фишек. Так, вращением левого круга вправо —  $\phi 4$ ,  $\phi 2$  — получаем позицию  $3 \overset{5}{\leftarrow} 5 \overset{4}{\leftarrow} 2 \overset{3}{\leftarrow} 1$  с двумя циклически соседними парами —  $\phi 3\phi 5$  и  $\phi 1\phi 2$ . Дальнейшее решение нам знакомо по примерам серии 3. Выбираем одну из циклически соседних пар, например  $\phi 3\phi 5$ , и переносим ее в правую вертикаль (на свои места). Запишем все 14-ходовое решение:

$$3 \overset{2}{\leftarrow} 5 \overset{3}{\leftarrow} 5 \overset{4}{\leftarrow} 2 \overset{3}{\leftarrow} 1 | 3 \overset{2}{\leftarrow} 2 \overset{3}{\leftarrow} 5 \overset{4}{\leftarrow} 1 4 5 \overset{2}{\leftarrow}.$$

Для задач 4-й серии характерно наличие в начальной позиции на правой вертикали пары фишек, которые в канонической циклической последовательности (см. рис. 6.5) не расположены по соседству друг с другом; они не являются непосредственно соседними — между ними в канонической циклической последовательности всегда имеется хотя бы одна фишка.

Такие две фишкки будем называть *несоседними в канонической циклической последовательности*. Примеры таких пар —  $\phi 1\phi 3$ ,  $\phi 1\phi 5$ ,  $\phi 5\phi 1$ ,  $\phi 5\phi 2$ ,  $\phi 2\phi 5$ ,  $\phi 2\phi 4$ ,  $\phi 4\phi 2$  и т. п. (но не  $\phi 2\phi 1$ ,  $\phi 5\phi 3$ ,  $\phi 1\phi 4$  и т. п.).

Искомая циклически соседняя пара фишек образуется при вращении по малому кругу, противоположному фиксированной вертикали, содержащей пару фишек, несоседних в канонической циклической последовательности. Очевидно, что хотя бы одна такая пара циклически соседних фишек обязательно получится в сочетании фишкки из малого круга с одной из фишек фиксированной (в задаче 41 — правой) вертикали. Кроме того, она может получиться и путем переноса средней вертикали, если в ней расположена такая пара. Покажем это на примере.

$$\text{Задача 42 } 3 \overset{4}{\leftarrow} 5 \overset{3}{\leftarrow} 3 \overset{5}{\leftarrow} 3 \overset{1}{\leftarrow} | 3 \overset{5}{\leftarrow} 1 2 3 \overset{\leftarrow}{1} \\ 1 \overset{\leftarrow}{2} \overset{\leftarrow}{2} 1 4 2 \overset{\leftarrow}{3} \overset{\leftarrow}{4} | 2 \overset{\leftarrow}{4} 4 \overset{\leftarrow}{5} 1.$$

После первого двухходового этапа решения на горизонталях получились две циклически соседние пары —  $\phi 4\phi 1$  и  $\phi 3\phi 5$ . Задача была решена относительно пары  $\phi 4\phi 1$ . Выпишем полученную при этом последовательность ходов, отделяя каждый этап точкой с запятой:

$$\phi 1, \phi 4; \phi 3, \phi 1, \phi 4; \phi 2, \phi 5, \phi 3, \phi 2; \phi 4.$$

Теперь приведем решение задачи относительно другой горизонтальной пары —  $\phi 3\phi 5$ :

$$3 \overset{4}{\leftarrow} 5 \overset{3}{\leftarrow} 3 \overset{5}{\leftarrow} 1 | 3 \overset{\leftarrow}{1} 2 3 \overset{\leftarrow}{1} \\ 1 \overset{\leftarrow}{2} \overset{\leftarrow}{2} 1 4 2 \overset{\leftarrow}{4} 2 | 5 \overset{\leftarrow}{4} 1 4 \overset{\leftarrow}{5} 1.$$

На это решение затрачено также 10 ходов. Более того — оба решения настолько похожи между собой, что если следить только за последовательностью ходов, а не за структурой решения, то они просто неразличимы. В самом деле, выпишем последовательность ходов второго решения:

$\phi_1, \phi_4; \phi_3, \phi_1, \phi_4, \phi_2, \phi_5, \phi_3; \phi_2; \phi_4.$

В обоих решениях последовательности ходов полностью совпадают, совпадает и порядок применения приемов решения — вращений по большому или малому кругу. Однако решения отличаются деталями, несущественными в отношении структуры решения. Это — фиксирование той или другой пары циклически соседних фишек, а также направление вращения фишек по определенному кругу.

Одна и та же структура решения при некоторых вариациях внутри того или другого этапа, вообще говоря, не обязательно приводит к конечной позиции за одинаковое число ходов, как показывает рассмотрение примеров, хотя разница в числе ходов для разных решений в этом смысле незначительна, а в некоторых случаях ее и нет совсем (как в только что рассмотренном примере). Эта разница становится гораздо более значительной, если изменяется сама структура решения, чередование различных приемов. В этом случае, как показывают проведенные эксперименты, число ходов может увеличиться в несколько раз по сравнению с минимально возможным (см., например, В. Н. Пушкин, 1965, с. 140).

**Задача 51** <sup>134</sup> <sub>25</sub>. Методами предыдущих серий эта задача не решается. Однако на горизонталях имеются три пары фишек, не-соседних в канонической циклической последовательности:  $\phi_1\phi_3$ ,  $\phi_3\phi_4$ ,  $\phi_5\phi_2$ . К 4-й серии эту позицию можно привести, как мы уже знаем, вращением по большому кругу до тех пор, пока одна из пар не попадает в крайнюю вертикаль. Запишем первые два этапа решения:

$$\begin{array}{ccccc} 1 & 3 & 4 & \leftarrow & 3 \\ & 2 & 5 & | & 4 & 5 \\ & 2 & 1 & | & 2 & 5 & 4 & 1 & 4 & 2 \end{array}$$

Полученная позиция, а следовательно, и дальнейшее решение совпадают с рассмотренными в задаче 42 после первого этапа. Задача решается за 14 ходов.

**Задача 61** <sup>321</sup> <sub>54</sub>. Здесь нет тех признаков в расположении фишек, которые бы определяли уже известные нам методы решения. Более того — все фишечки расположены в порядке, обратном канонической циклической последовательности (см. рис. 6.5), и никакое вращение по большому кругу не изменит их взаимные связи.

Чтобы прийти к методам предыдущей серии решений, надо разрушить эту структуру вращением по малому кругу. Фиксируя

правую вертикаль, вращением по левому кругу вправо —  $\phi_5$ ,  $\phi_2$  — получаем  $\begin{smallmatrix} 3 & 1 \\ 5 & 2 & 4 \end{smallmatrix}$ . На горизонталях здесь расположены пары фишек, несоседних в канонической циклической последовательности —  $\phi_3\phi_1$ ,  $\phi_4\phi_2$ ,  $\phi_2\phi_5$ . Позиции такой структуры рассмотрены в 5-й серии решений. Приводим полное 20-ходовое решение этой задачи:

$$\begin{smallmatrix} 3 & 2 \\ 5 & 4 \end{smallmatrix} \mid \begin{smallmatrix} 1 & \rightarrow & 3 & 1 & \rightarrow & 5 \\ 4 & 2 & 5 & 2 & 4 & 3 & 2 \end{smallmatrix} \mid \begin{smallmatrix} 3 & 1 & \leftarrow & 5 & 4 & \rightarrow & 2 \\ 4 & 5 & 2 & 1 & 3 & 1 & \mid \\ & & & & & & \end{smallmatrix} \mid \begin{smallmatrix} 5 & 4 & \leftarrow & 2 & 3 & \rightarrow & 2 \\ 3 & 5 & 1 & 4 & 5 & 2 & \end{smallmatrix}.$$

На предпоследнем этапе вращение по малому кругу в другую сторону увеличивает число ходов на 2:

$$\begin{smallmatrix} 2 \\ 1 \end{smallmatrix} \mid \begin{smallmatrix} 5 & 4 & \rightarrow & 2 & 3 & 5 \\ 3 & 4 & 1 & 4 & 5 \end{smallmatrix}.$$

Рассмотрим другое 20-ходовое решение этой же задачи. После 1-го этапа (отличного от рассмотренного в первом решении) получаются другие пары фишек, несоседних в канонической циклической последовательности. Приводим полное решение (20 ходов):

$$\begin{smallmatrix} 3 & 2 \\ 5 & 4 \end{smallmatrix} \mid \begin{smallmatrix} 1 & \leftarrow & 2 & 5 & 1 & \rightarrow & 2 \\ 4 & 3 & 3 & 4 & 3 & 3 & 4 \end{smallmatrix} \mid \begin{smallmatrix} 5 & 5 & \leftarrow & 4 & 3 & 5 & \rightarrow & 4 \\ 1 & 5 & 2 & 1 & 3 & 2 & 1 & \mid \\ & & & & & & & \end{smallmatrix} \mid \begin{smallmatrix} 3 & \rightarrow & 6 \\ 5 & \end{smallmatrix}.$$

#### § 6.4. Структура решения задачи

*Два приема решения — вращение по большому кругу и вращение по малому кругу, не сводящиеся один к другому. Минимизация и оптимизация решения. Структура позиции определяет план решения задачи. Шесть типов задач. Схема решения задачи.*

Из § 6.3 следует, что при решении задач используются лишь два приема:

1) вращение по большому кругу, которое сохраняет циклическую последовательность фишек исходной позиции;

2) вращение по малому кругу (левому или правому), которое, вообще говоря, разрушает циклическую последовательность фишек исходной позиции, образуя новые пары фишек в циклической последовательности.

Решение задачи сводится к некоторой упорядоченной последовательности этих двух приемов. Каждый из них используется в зависимости от того, что требуется на данном этапе решения — сохранить или разрушить циклическую последовательность фишек в позиции. Приемы не сводятся друг к другу.

Вращением фишек по большому или малому кругу рано или поздно можно прийти от начальной позиции к конечной. Но одну и ту же задачу можно решить за разное число ходов — например,

за 6 или за 156 (В. Н. Пушкин, 1965, с. 140). Нерациональное, бесплановое, бесструктурное решение требует значительно большего числа ходов. И, наоборот, структурное, рациональное решение оптимизирует число затраченных ходов.

При анализе решений задач мы переходили от задач с простой структурой решения к задачам с более сложной структурой, требующей более разветвленных методов и сочетания разных приемов решения, а также использования большого числа различных элементов решения задач (таких, например, понятий, как циклически соседняя пара фишек, пара фишек, несоседних в канонической циклической последовательности, обратная каноническая циклическая последовательность и др.). В процессе решения его способы формируются большей частью интуитивно; из разных возможных способов решения испытуемый выбирает (в уме) один из наиболее подходящих («лучший») по некоторым критериям, не всегда осознаваемым.

Приведенный выше анализ позволяет составить план, схему решения задачи, исходя из структуры позиции. Основным требованием к схеме является структурность решения. Схема должна учитывать все особенности структуры позиции, как начальной, так и промежуточной,— на любом этапе решения задачи. В зависимости от условий, которым удовлетворяет эта позиция, выбирается тот или другой прием решения или ход.

Составим схему решения задачи, исходя из структуры позиции. Сначала для классификации задач введем понятие типа задачи. *Тип задачи* определяется структурой начальной (или исходной) позиции — взаимным расположением фишек в ней, что в свою очередь определяет структуру решения. Разделим все разрешимые позиции (начальные или промежуточные) на семь типов. К типу *T* ( $T = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6$ ) отнесем только те задачи, которые не принадлежат к типу с меньшим номером, чем *T*. Каждый тип характеризуется следующими признаками:

**Тип 0.** Вырожденный случай, когда исходная позиция совпадает с конечной.

**Тип 1.** Позиция образует каноническую циклическую последовательность.

**Тип 2.** Позиция содержит пару циклически соседних фишек в правой вертикали.

**Тип 3.** Позиция содержит пару циклически соседних фишек на горизонтали или в левой диагонали.

**Тип 4.** Позиция содержит пару фишек, несоседних в канонической циклической последовательности, в правой вертикали.

**Тип 5.** Позиция содержит пару фишек, несоседних в канонической циклической последовательности, на горизонтали или в левой диагонали.

**Тип 6.** Позиция представляет собой последовательность фишек, обратную канонической циклической последовательности.

Примеры задач, рассмотренных в § 6.3, показывают следующее.

Решение задачи сводится к последовательному упрощению структуры позиции, к переходу на каждом этапе решения от позиции типа  $T$  к позиции типа  $T - 1$ . Такой переход представлен схемой решения, приведенной ниже.

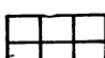
На схеме для каждого типа  $T$  указан начальный этап решения. После реализации этого этапа (путем применения одного из двух приемов) получается позиция типа не выше  $T - 1$ , для которой аналогичным образом отыскивается соответствующий вход в схему. Последовательное выполнение этих этапов приводит к конечной позиции за оптимальное число ходов.

Такая схема может быть полезной при практическом решении задач и служит бланком-ориентиром. Вместо многоточий на схеме следует выписать соответствующие данные: полученные на этом этапе пары фишек; конкретную пару фишек, выбранную для переноса в вертикаль; перечень ходов, реализующих этот этап, и их число. Там, где указывается альтернатива (левая или правая вертикаль, вращение влево или вправо), следует подчеркнуть слово, соответствующее выбранному варианту. После указания всех этих данных подсчитывается общее число ходов, затраченных на решение. После каждого хода надо проверить условие, которое должно быть выполнено на этом этапе.

При решении задач по схеме выбор одной пары фишек из нескольких, имеющихся на горизонтали или левой диагонали, выбор крайней вертикали для соответствующей пары фишек, а также выбор направления вращения фишек производятся по некоторым определенным критериям. Эти критерии, исходя из которых выбирается одна из нескольких возможностей, связаны с оптимальностью решения на данном этапе (выражаемой, например, расстоянием фишек до своих мест в конечной позиции и т. п.) либо с перебором всех возможных решений или с другими соображениями.

### СХЕМА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

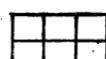
Тип 6. Начальная позиция:



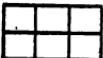
Вращение по левому кругу (вправо, влево) до получения на горизонтали пары несоседних в канонической циклической последовательности фишек (... , ... , ...) ... ходами — ...

Получена позиция:

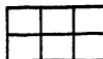
Тип 5. Исходная позиция:



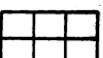
Вращение по большому кругу (вправо, влево) до переноса пары несоседних в канонической циклической последовательности фишек (...) с горизонтали или левой диагонали в A-ю (...) вертикаль ( $A = 1$  или  $3$  — номера левой или правой вертикали) за ... ходов — ...

Получена позиция:  
Тип 4. Исходная позиция: 

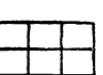
Фиксирование  $A$ -й вертикали. Вращение по противоположному малому ( $4 - A$ )-му кругу (вправо, влево) до получения на горизонтали пары циклически соседних фишек (...) за ... ходов — ...

Получена позиция:  
Тип 3. Исходная позиция: 

Вращение по большему кругу (вправо, влево) до переноса пары циклически соседних фишек (...) с горизонтали или левой диагонали в  $B$ -ю (...) вертикаль ( $B = 1$  или  $3$  — номера левой или правой вертикали) за ... ходов — ...

Получена позиция:  
Тип 2. Исходная позиция: 

Фиксирование  $B$ -й вертикали. Вращение по противоположному малому ( $4 - B$ )-му кругу (вправо, влево) до получения канонической циклической последовательности за ... ходов — ...

Получена позиция:  
Тип 1. Исходная позиция: 

Вращение по большему кругу (вправо, влево) до получения конечной позиции за ... ходов — ...

Получена конечная позиция: 

## § 6.5. Разрешимость игры в 5

*Инверсия. Четность числа инверсий. Правильный ход сохраняет четность числа инверсий в позиции. Признак разрешимости задачи — совпадение четности числа инверсий в начальной и конечной позициях.*

Известно, что в игре в 5, так же как и в игре в 15, не любая начальная позиция может быть приведена к заданной конечной позиции, иначе говоря, не любая задача разрешима. Так, никакая последовательность ходов не приведет позицию  $\begin{smallmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 \end{smallmatrix}$  к

позиции  $\begin{smallmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 \end{smallmatrix}$  — эта задача неразрешима.

Математически строго показано, что для любых позиций игры в 15 или в 5 можно априори (не решая) установить, разрешима или неразрешима данная задача. Приведем здесь вывод признака разрешимости (или неразрешимости) задачи при игре в 5. Для этого нам придется использовать понятие инверсии.

*Инверсией*, или беспорядком, называют нарушение порядка в некоторой паре знаков (чисел, букв и т. п.) по отношению к некоторому стандартному их расположению. Так, если стандартным расположением целых положительных чисел считать их натуральный ряд в возрастающем порядке — 1, 2, ..., то в расположении пары чисел 3, 5 нарушения порядка нет (число инверсий равно нулю), а в обратном расположении этой же пары, при их перестановке — 5, 3, — имеется одна инверсия (беспорядок), поскольку большее число 5 стоит перед меньшим числом 3.

Для нас при рассмотрении инверсий в некоторой последовательности знаков важно не число инверсий, а его четность. Так, в последовательности  $\overbrace{24} \overbrace{15} \overbrace{3}$  — четыре инверсии (отмеченные скобками), т. е. число инверсий четно. Если считать стандартным расположением букв  $a b c$ , то в последовательности  $c \overbrace{b} a$  имеются три инверсии — число инверсий нечетно.

Рассмотрим число инверсий в позиции. Для этого установим соответствие между позицией игры в 5 и циклической последовательностью номеров фишек, образующих эту позицию (см. § 6.3). Обозначим через  $a, b, c, d, e$  пять различных цифр из набора 1, 2, 3, 4, 5. Позиции вида

$$\begin{matrix} a & b & c \\ & e & d \end{matrix} \quad (6.1)$$

поставим в соответствие последовательность номеров

$$a \ b \ c \ d \ e. \quad (6.2)$$

Эта последовательность (часть циклической последовательности) образуется из номеров фишек, следующих в позиции (6.1) по большому кругу по часовой стрелке, начиная с номера первой левой фишкой верхней горизонтали. Последовательность (6.2) соответствует не только позиции (6.1), но и позициям

$$\begin{matrix} a & b & c & a & b & a & b \\ e & d' & e & d, & e & d & c' & e & d & c' & e & d & c \end{matrix} \quad (6.3)$$

Таким образом, любой позиции из набора (6.1) и (6.3) соответствует последовательность (6.2).

Рассмотрение последовательности  $a b c d e$ , а не  $a b c e d$  не ограничивает общности рассуждений, так как существенно не само число инверсий, а его четность, точнее, сохранение четности. Аналогичные рассуждения справедливы и по отношению к последовательности  $a b c e d$  для позиции (6.1).

*Числом инверсий* в позиции (6.1) или (6.3) называют число инверсий в последовательности номеров (6.2), соответствующей этой позиции.

Покажем, что любой ход в игре не меняет четности числа инверсий в позиции. Как было показано в § 6.4, любой ход или

последовательность ходов сводится к вращению по большому или малому кругу. Рассмотрим позицию  $\begin{smallmatrix} a & b & c \\ & e & d \end{smallmatrix}$  и соответствующую ей последовательность  $a \ b \ c \ d \ e$ .

Рассмотрим вращение по большому кругу. При вращении фишек по часовой стрелке последовательность пяти ходов —  $\phi e$ ,  $\phi d$ ,  $\phi c$ ,  $\phi b$ ,  $\phi a$ , образующих соответственно позиции (6.3), не изменяет соответствующую им последовательность  $a \ b \ c \ d \ e$ , а следовательно, не меняет ни числа инверсий, ни его четности. Следующий ход —  $\phi e$  — приводит к позиции  $\begin{smallmatrix} e & a & b \\ & d & c \end{smallmatrix}$  соответствующей последовательностью  $e \ a \ b \ c \ d$ . Комбинации  $a \ b \ c \ d \ e$  и  $e \ a \ b \ c \ d$  отличаются лишь циклическим переносом  $e$  с пятого места на первое, что равносильно следующей цепочке перестановок, отмеченных скобкой:

$$a \ b \ c \ d \ e, \ a \ b \ c \ e \ d, \ a \ b \ e \ c \ d, \ a \ e \ b \ c \ d, \ e \ a \ b \ c \ d. \quad (6.4)$$

При каждой перестановке двух соседних символов число инверсий в комбинации меняется на единицу и, следовательно, меняется четность числа инверсий. Это очевидно, так как перестановка двух соседних символов отражается лишь на них, не затрагивая остальных элементов последовательности. Так, если начальная комбинация имеет вид 12354, то такими парами соседних цифр будут 54 и 45, 34 и 43, 24 и 42, 14 и 41. Наша последовательность (6.4) состоит из пяти цифр, поэтому для циклического переноса цифры требуются четыре последовательные перестановки пары соседних цифр и, следовательно, в результате четность первоначальной комбинации сохраняется. Дальнейшее вращение по большому кругу сводится к рассмотренным случаям. Аналогичное имеет место и при вращении в обратном направлении.

Таким образом, показано, что любой ход при вращении по большому кругу не меняет четности числа инверсий в позиции.

Рассмотрим теперь вращение по малому кругу. Не ограничиваая общности рассуждений, для определенности в позиции  $\begin{smallmatrix} a & b & c \\ & e & d \end{smallmatrix}$  (с соответствующей последовательностью  $a \ b \ c \ d \ e$ ) зафиксируем правую вертикаль и будем вращать по часовой стрелке фишками противоположного левого круга. Передвижение фишек сводится к следующим четырем ходам (для каждого хода приводится также полученная позиция и соответствующая ей комбинация):

$$\begin{aligned} \phi e: & \begin{smallmatrix} a & b & c \\ e & d \end{smallmatrix}, \ a \ b \ c \ d \ e; \quad \phi b: \begin{smallmatrix} a & c \\ e & b \ d \end{smallmatrix}, \ a \ c \ d \ b \ e; \\ \phi a: & \begin{smallmatrix} a & c \\ e & b \ d \end{smallmatrix}, \ a \ c \ d \ b \ e; \quad \phi e: \begin{smallmatrix} e & a & c \\ b & d \end{smallmatrix}, \ e \ a \ c \ d \ b. \end{aligned}$$

Горизонтальные ходы —  $\phi e$  и  $\phi a$ , а также ход  $\phi e$  по крайней

вертикали, как было показано в случае вращения по большому кругу, не меняют четности числа инверсий в позиции. Рассмотрим ход  $fb$ . Он приводит позицию  $\begin{matrix} a & b & c \\ e & d \end{matrix}$  к  $\begin{matrix} a & e \\ e & b & d \end{matrix}$ . Им соответствуют комбинации  $abcde$  и  $acdbe$ , которые отличаются лишь переносом цифры  $b$  через пару цифр  $cd$ , что равносильно следующей цепочке перестановок:

$$abcde, \quad \underline{acbde}, \quad \underline{acdbe}.$$

Так как число перестановок здесь равно двум, т. е. четно, то четность числа инверсий не меняется.

Дальнейшее вращение по малому кругу в прямом и обратном направлениях и вращение по другому малому кругу сводятся к уже рассмотренным случаям. Этим доказано, что любой ход при вращении по малому кругу не меняет четности числа инверсий в позиции.

Таким образом, мы доказали, что любой ход, сделанный по правилам игры в 5, сохраняет четность числа инверсий в позиции, которая совпадает с четностью исходной позиции. Отсюда следует *признак разрешимости*: если четность числа инверсий в начальной и конечной позициях одна и та же, то задача разрешима. В противном случае задача неразрешима и никакие ходы не смогут преобразовать начальную позицию в конечную.

### § 6.6. Классификация разрешимых задач

*Перестановки и позиции. Разрешимые и неразрешимые позиции. Распределение разрешимых задач по типам.*

Определим число разрешимых задач игры в 5 и их типы.

Из пяти разных знаков  $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$  можно составить  $1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5 = 5! = 120$  различных перестановок. Эти перестановки можно составить разными способами. Мы будем учитывать специфику игры в 5, а именно расположение цифр 1, 2,

Таблица 6.1

1 2 3	1 2 4	1 2 5	1 3 2	1 3 4	1 3 5
1 4 2	1 4 3	1 4 5	1 5 2	1 5 3	1 5 4
2 1 3	2 1 4	2 1 5	2 3 1	2 3 4	2 3 5
2 4 1	2 4 3	2 4 5	2 5 1	2 5 3	2 5 4
3 1 2	3 1 4	3 1 5	3 2 1	3 2 4	3 2 5
3 4 1	3 4 2	3 4 5	3 5 1	3 5 2	3 5 4
4 1 2	4 1 3	4 1 5	4 2 1	4 2 3	4 2 5
4 3 1	4 3 2	4 3 5	4 5 1	4 5 2	4 5 3
5 1 2	5 1 3	5 1 4	5 2 1	5 2 3	5 2 4
5 3 1	5 3 2	5 3 4	5 4 1	5 4 2	5 4 3

**3, 4, 5 в начальной позиции.** Условимся, что комбинация знаков  $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$  расставляется на доске так:

$a_1$	$a_2$	$a_3$		
$a_4$	$a_5$			
			1	2
			3	4
			5	

(напри-  
мер, комбинация 12345 записывается в позицию 45). Исходя из этого, составим перестановки следующим способом. Первые три цифры  $a_1a_2a_3$  образуют различные размещения из пяти

Таблица 6.2

№ п/п	Перестановки	Число инверсий	№ п/п	Перестановки	Число инверсий	№ п/п	Перестановки	Число инверсий
1	1 2 3 4 5	0	41	2 4 5 1 3	5—	81	4 2 3 1 5	5—
2	1 2 3 5 4	1—	42	2 4 5 3 1	6	82	4 2 3 5 1	6
3	1 2 4 3 5	1—	43	2 5 1 3 4	4	83	4 2 5 1 3	6
4	1 2 4 5 3	2	44	2 5 1 4 3	5—	84	4 2 5 3 1	7—
5	1 2 5 3 4	2	45	2 5 3 1 4	5—	85	4 3 1 2 5	5—
6	1 2 5 4 3	3—	46	2 5 3 4 1	6	86	4 3 1 5 2	6
7	1 3 2 4 5	1—	47	2 5 4 1 3	6	87	4 3 2 1 5	6
8	1 3 2 5 4	2	48	2 5 4 3 1	7—	88	4 3 2 5 1	7—
9	1 3 4 2 5	2	49	3 1 2 4 5	2	89	4 3 5 1 2	7—
10	1 3 4 5 2	3—	50	3 1 2 5 4	3—	90	4 3 5 2 1	8
11	1 3 5 2 4	3—	51	3 1 4 2 5	3—	91	4 5 1 2 3	6
12	1 3 5 4 2	4	52	3 1 4 5 2	4	92	4 5 1 3 2	7—
13	1 4 2 3 5	2	53	3 1 5 2 4	4	93	4 5 2 1 3	7—
14	1 4 2 5 3	3—	54	3 1 5 4 2	5—	94	4 5 2 3 1	8
15	1 4 3 2 5	3—	55	3 2 1 4 5	3—	95	4 5 3 1 2	8
16	1 4 3 5 2	4	56	3 2 1 5 4	4	96	4 5 3 2 1	9—
17	1 4 5 2 3	4	57	3 2 4 1 5	4	97	5 1 2 3 4	4—
18	1 4 5 3 2	5—	58	3 2 4 5 1	5—	98	5 1 2 4 3	5—
19	1 5 2 3 4	3—	59	3 2 5 1 4	5—	99	5 1 3 2 4	5—
20	1 5 2 4 3	4	60	3 2 5 4 1	6	100	5 1 3 4 2	6
21	1 5 3 2 4	4	61	3 4 1 2 5	4	101	5 1 4 2 3	6
22	1 5 3 4 2	5—	62	3 4 1 5 2	5—	102	5 1 4 3 2	7—
23	1 5 4 2 3	5—	63	3 4 2 1 5	5—	103	5 2 1 3 4	5—
24	1 5 4 3 2	6	64	3 4 2 5 1	6	104	5 2 1 4 3	6
25	2 1 3 4 5	1—	65	3 4 5 1 2	6	105	5 2 3 1 4	6
26	2 1 3 5 4	2	66	3 4 5 2 1	7—	106	5 2 3 4 1	7—
27	2 1 4 3 5	2	67	3 5 1 2 4	5—	107	5 2 4 1 3	7—
28	2 1 4 5 3	3—	68	3 5 1 4 2	6	108	5 2 4 3 1	8
29	2 1 5 3 4	3—	69	3 5 2 1 4	6	109	5 3 1 2 4	6
30	2 1 5 4 3	4	70	3 5 2 4 1	7—	110	5 3 1 4 2	7—
31	2 3 1 4 5	2	71	3 5 4 1 2	7—	111	5 3 2 1 4	7—
32	2 3 1 5 4	3—	72	3 5 4 2 1	8	112	5 3 2 4 1	8
33	2 3 4 1 5	3—	73	4 1 2 3 5	3—	113	5 3 4 1 2	8
34	2 3 4 5 1	4	74	4 1 2 5 3	4	114	5 3 4 2 1	9—
35	2 3 5 1 4	4	75	4 1 3 2 5	4	115	5 4 1 2 3	7—
36	2 3 5 4 1	5—	76	4 1 3 5 2	5—	116	5 4 1 3 2	8
37	2 4 1 3 5	3—	77	4 1 5 2 3	5—	117	5 4 2 1 3	8
38	2 4 1 5 3	4	78	4 1 5 3 2	6	118	5 4 2 3 1	9—
39	2 4 3 1 5	4	79	4 2 1 3 5	4	119	5 4 3 1 2	9—
40	2 4 3 5 1	5—	80	4 2 1 5 3	5—	120	5 4 3 2 1	10

элементов 1, 2, 3, 4, 5 по три. Число их равно  $5 \cdot 4 \cdot 3 = 60$ . Для наглядности выпишем их в табл. 6.1 по строкам в возрастающем порядке первых трех цифр.

Из оставшихся двух цифр  $a_4$ ,  $a_5$ , дополняющих комбинацию  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  до всего набора 12345, для каждого размещения  $a_1a_2a_3$  составим различные перестановки. Для каждой из 60 комбинаций  $a_1a_2a_3$  их будет две ( $a_4a_5$  и  $a_5a_4$ ).

Таким образом, объединяя  $a_1a_2a_3$  с соответствующей комбинацией  $a_4a_5$ , получаем  $60 \cdot 2 = 120$  различных соединений из пяти различных цифр по пять. Число их совпадает с числом различных перестановок из пяти различных цифр. Используя табл. 6.1, выпишем все эти перестановки в возрастающем порядке цифр (табл. 6.2). Все комбинации цифр, соответствующие неразрешимым позициям (с нечетным числом инверсий), отмечены справа знаком —.

Таблица 6.3

№ п/п	Пози- ция	Тип задачи	№№ п/п	Пози- ция	Тип задачи	№№ п/п	Пози- ция	Тип задачи	№№ п/п	Пози- ция	Тип задачи
1	1 2 3		16	2 3 1		31	3 4 1		46	4 5 1	
	4 5	1		4 5	3		2 5	3		2 3	4
2	1 2 4		17	2 3 4		32	3 4 2		47	4 5 2	
	5 3	3		5 1	2		5 1	5		3 1	5
3	1 2 5		18	2 3 5		33	3 4 5		48	4 5 3	
	3 4	2		1 4	1		1 2	4		1 2	6
4	1 3 2		19	2 4 1		34	3 5 1		49	5 1 2	
	5 4	4		5 3	3		4 2	2		3 4	3
5	1 3 4		20	2 4 3		35	3 5 2		50	5 1 3	
	2 5	5		1 5	2		1 4	3		4 2	5
6	1 3 5		21	2 4 5		36	3 5 4		51	5 1 4	
	4 2	3		3 1	4		2 1	1		2 3	4
7	1 4 2		22	2 5 1		37	4 1 2		52	5 2 1	
	3 5	4		3 4	5		5 3	1		4 3	4
8	1 4 3		23	2 5 3		38	4 1 3		53	5 2 3	
	5 2	5		4 1	4		2 5	2		1 4	3
9	1 4 5		24	2 5 4		39	4 1 5		54	5 2 4	
	2 3	6		1 3	3		3 2	3		3 1	2
10	1 5 2		25	3 1 2		40	4 2 1		55	5 3 1	
	4 3	2		4 5	3		3 5	4		2 4	5
11	1 5 3		26	3 1 4		41	4 2 3		56	5 3 2	
	2 4	4		5 2	4		5 1	3		4 1	6
12	1 5 4		27	3 1 5		42	4 2 5		57	5 3 4	
	3 2	3		2 4	2		1 3	5		1 2	4
13	2 1 3		28	3 2 1		43	4 3 1		58	5 4 1	
	5 4	4		5 4	6		5 2	2		3 2	1
14	2 1 4		29	3 2 4		44	4 3 2		59	5 4 2	
	3 5	6		1 5	5		1 5	4		1 3	2
15	2 1 5		30	3 2 5		45	4 3 5		60	5 4 3	
	4 3	5		4 1	4		2 1	3		2 1	3

В нашем случае стандартной конечной позицией служит **12345**, или соответственно комбинация цифр **12345**, с четным (нулевым) числом инверсий. Отсюда на основании положения § 6.5 о сохранении четности числа инверсий при выполнении ходов следует, что в любой разрешимой начальной позиции число инверсий должно быть четным. Все перестановки из пяти различных цифр по пять можно получить из комбинации **12345** последовательной перестановкой двух соседних цифр. Однако, как показано в § 6.5, при каждой такой перестановке двух соседних цифр число инверсий в комбинации из пяти различных цифр меняется на единицу и четность числа инверсий меняется на обратную. Отсюда вытекает, что из всех 120 различных перестановок

Таблица 6.4

Тип 1. 5 позиций				
1 2 3	2 3 5	3 5 4	4 1 2	5 4 1
4 5	1 4	2 1	5 3	3 2
Тип 2. 10 позиций				
1 2 5	1 5 2	2 3 4	2 4 3	3 1 5
3 4	4 3	5 1	1 5	2 4
3 5 1	4 1 3	4 3 1	5 2 4	5 4 2
4 2	2 5	5 2	3 1	1 3
Тип 3. 15 позиций				
1 2 4	1 3 5	1 5 4	2 3 1	2 4 1
5 3	4 2	3 2	4 5	5 3
2 5 4	3 1 2	3 4 1	3 5 2	4 1 5
1 3	4 5	2 5	1 4	3 2
4 2 3	4 3 5	5 1 2	5 2 3	5 4 3
5 1	2 1	3 4	1 4	2 1
Тип 4. 15 позиций				
1 3 2	1 4 2	1 5 3	2 1 3	2 4 5
5 4	3 5	2 4	5 4	3 1
2 5 3	3 1 4	3 2 5	3 4 5	4 2 1
4 1	5 2	4 1	1 2	3 5
4 3 2	4 5 1	5 1 4	5 2 1	5 3 4
1 5	2 3	2 3	4 3	1 2
Тип 5. 10 позиций				
1 3 4	1 4 3	2 1 5	2 5 1	3 2 4
2 5	5 2	4 3	3 4	1 5
3 4 2	4 2 5	4 5 2	5 1 3	5 3 1
5 1	1 3	3 1	4 2	2 4
Тип 6. 5 позиций				
1 4 5	2 1 4	3 2 1	4 5 3	5 3 2
2 3	3 5	5 4	1 2	4 1

количество комбинаций с четным числом инверсий равно количеству комбинаций с нечетным числом инверсий. Следовательно, число разрешимых позиций совпадает с числом неразрешимых позиций и равно 60.

В табл. 6.3 выписаны все разрешимые позиции. Для каждой из них указан тип задачи. Принадлежность той или другой по-

Таблица 6.5

Тип задачи	1	2	3	4	5	6
Количество начальных позиций	5	10	15	15	10	5

зиции к определенному типу задачи устанавливается в соответствии с признаками этого типа, которые обнаруживаются в позиции. Тип позиции определяется ее структурой — взаимным расположением фишек в позиции (см. § 6.4).

В табл. 6.4 все разрешимые задачи (начальные позиции) игры в 5 для наглядности упорядочены по типам.

Табл. 6.5 показывает распределение числа задач (начальных позиций) по типам.

### § 6.7. Варьированные ситуации

*Варьирование процесса игры в 5. Перекодирование позиции. Эквивалентные задачи — сходство структур и различие внешнего вида. Восприятие эквивалентных задач и сложность их решения из-за маскировки структуры. Инвариантные и маскирующие элементы в решении эквивалентных задач.*

В некоторых экспериментах с игрой в 5 варьируется ее внешний вид. Так, вместо стандартной конечной позиции 123 можно использовать любую другую позицию, например 45324. Кроме того, вместо цифр фишку могут содержать и другие знаки — буквы, фигуры и отличаться различными цветами. Во всех этих случаях структура игры — структура начальной позиции и условия существования решения остаются неизменными. Происходит только перекодирование внешней формы фишек.

Задачи с конечной позицией, не совпадающей со стандартной, будем, следуя В. М. Фетисову, проводившему эксперименты по решению таких задач, называть *эквивалентными* (В. М. Фетисов, 1969), а задачи со стандартной конечной позицией будем называть *стандартными*.

Определим теперь понятие эквивалентных задач. Обозначим через  $A$  некоторое множество различных начальных позиций  $a_p$  ( $a_p \in A$ ), для которых конечной позицией служит стандартная конечная позиция  $a_0 = \frac{123}{45}$  ( $a_0 \in A$ ). Пятерка цифр  $\{x\} =$

$= \{1, 2, 3, 4, 5\}$ , составляющих набор номеров фишек, поставим в соответствие пятерку (вообще говоря, других) символов  $\{e_x\}$ . Таким образом, символ  $e_x$  однозначно кодирует исходный символ (цифру)  $x$ .

Пример. Пусть  $e_x$  принимает следующие значения:  $e_1 = 5$ ,  $e_2 = 2$ ,  $e_3 = 4$ ,  $e_4 = 1$ ,  $e_5 = 3$ ; тогда позиция  $a_0 = \begin{smallmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 \end{smallmatrix}$  преобразуется в позицию  $b_0 = \begin{smallmatrix} 5 & 2 & 4 \\ 1 & 3 \end{smallmatrix}$ .

В результате такого кодирования ( $x \rightarrow e_x$ ) каждый элемент  $a_p$  множества позиций  $A$  однозначно преобразуется в некоторый элемент  $b_c$ , т. е. каждому элементу  $a_p$  соответствует один и только один элемент  $b_c$ . Различные элементы  $b_c$ , соответствующие всем элементам  $a_p$  множества  $A$ , образуют множество  $B$  ( $b_c \in B$ ). Каждый элемент  $b_c$  представляет собой начальную позицию, для которой конечной позицией служит  $b_0$ . Таким образом, множеству начальных позиций  $A$  однозначно соответствует множество начальных позиций  $B$ .

Установленное соответствие множеств  $A$  и  $B$ , вообще говоря, не будет взаимно однозначным, так как нельзя утверждать, что элементу  $b_c$  всегда соответствует только один элемент  $a_p$ . В самом деле, допустим, что множество  $A$  состоит из трех элементов:

$a_0 = \begin{smallmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 \end{smallmatrix}$ ,  $a_1 = \begin{smallmatrix} 2 & 3 & 1 \\ 4 & 5 \end{smallmatrix}$ ,  $a_2 = \begin{smallmatrix} 3 & 2 & 1 \\ 4 & 5 \end{smallmatrix}$ , и пусть набору номеров  $\{x\} = \{1, 2, 3, 4, 5\}$  отвечает набор  $\{e_x\} = \{1, 1, 1, 4, 5\}$  (это не противоречит определению). Тогда каждая из трех позиций  $a_0, a_1, a_2$  соот-

ветствует одной и той же позиции  $\begin{smallmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 4 & 5 \end{smallmatrix}$ . Таким образом, каждой из различных позиций  $a_0, a_1, a_2$  множества  $A$  соответствует од-

на позиция  $b_0 = \begin{smallmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 4 & 5 \end{smallmatrix}$  множества  $B$ , в то время как одной пози-

ции  $b_0 = \begin{smallmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 4 & 5 \end{smallmatrix}$  множества  $B$  соответствуют три различные позиции  $a_0, a_1, a_2$  множества  $A$ . Для взаимно однозначного соответствия множеств  $A$  и  $B$  требуется дополнительное условие, а именно, чтобы все пять символов  $e_x$  ( $x = 1, 2, 3, 4, 5$ ) попарно были различны.

В дальнейшем будем рассматривать только взаимно однозначные соответствия множеств позиций  $A$  и  $B$ . Соответствующие позиции  $a_p$  и  $b_c$  будем называть эквивалентными, а соответствующие задачи  $(a_p, a_0)$  и  $(b_c, b_0)$  — эквивалентными задачами.

Легко видеть, что если элементы множеств  $A$  и  $B$  представляют собой разные последовательности из пяти первых целых чисел  $1, 2, 3, 4, 5$ , то для стандартной конечной позиции  $\begin{smallmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 \end{smallmatrix}$  существуют 120 различных эквивалентных ей позиций и соответ-

ственno для каждой из 60 разрешимых задач с этой конечной позицией будут существовать 120 различных эквивалентных ей задач.

Заметим также, что при использованном преобразовании четность позиции может измениться, но для всех элементов множества  $B$  четность числа инверсий одинакова.

Отсюда следует, что все эквивалентные между собой задачи решаются одинаковым способом за одинаковое число ходов, причем при совпадении положения пустого поля в конечной позиции (например, №6) сохраняется и последовательность передвижения фишек на игральной доске. Действительно, преобразование не меняет относительного расположения элементов в позициях, и поэтому отношения элементов в начальной и конечной позициях, т. е. структуры эквивалентных задач, совпадают. Из этого следует также, что эквивалентные задачи всегда принадлежат к одному и тому же типу.

Разумеется, записи решения теми способами кодирования, в которых отражены номера фишек и промежуточные позиции, для эквивалентных задач будут различными.

Рассмотрим для пояснения сказанного пример. При этом воспользуемся способом записи решения, приведенным в § 6.3, несколько изменив его, чтобы не записывать промежуточных позиций. Для каждого этапа решения будем указывать лишь величину круга (большой или малый), по которому врачаются фишки, и фиксированную вертикаль при вращении по малому кругу, а также направление вращения и число ходов при таком вращении.

Горизонтальная черта с примыкающей к ней слева или справа вертикальной чертой  $\Gamma$  или  $\bar{\Gamma}$  обозначает, что зафиксирована левая или правая соответственно вертикаль и осуществляется вращение по противоположному малому кругу. Горизонтальная черта без примыкающей вертикальной черты обозначает вращение по большому кругу. Стрелка на горизонтальной черте указывает направление вращения, а число под ней — количество ходов при этом. Так, например, фиксация левой вертикали и пятиходовое вращение по правому кругу влево обозначается  $\overleftarrow{15}$ , четырехходовое вращение по большому кругу вправо  $\overrightarrow{4}$ . При записи решения вначале приводятся начальная и конечная позиции.

Запишем 14-ходовое решение задачи 51 из § 6.3.

$$\begin{array}{ccccccccc} 1 & 3 & 4 & \quad & 1 & 2 & 3 & \leftarrow & \bar{\Gamma} \\ 25, & & & & 45: & 2 & & & \end{array} \quad \begin{array}{c} \bar{\Gamma} \\ 4 \\ 3 \\ \bar{\Gamma} \\ 4 \\ 1 \end{array}$$

Приведем решение эквивалентной ей задачи:

$$\begin{array}{ccccccccc} 3 & 4 & 5 & \quad & 3 & 2 & 4 & \leftarrow & \bar{\Gamma} \\ 21, & & & & 51: & 2 & & & \end{array} \quad \begin{array}{c} \bar{\Gamma} \\ 4 \\ 3 \\ \bar{\Gamma} \\ 4 \\ 1 \end{array}$$

Таким образом, число и последовательность элементов решения у стандартной и эквивалентной ей задачи совпадают.

Заметим, что в стандартной задаче позиции характеризуются четным числом инверсий, а в эквивалентной ей задаче это число нечетно.

В экспериментах с игрой в 5 выяснилось, что у испытуемого, решавшего лишь стандартные задачи, вырабатывается определенный стереотип. Для него становятся привычными цифры на фишках, структура решения, вид конечной позиции с расположением цифр на доске в возрастающем порядке. В результате приобретения опыта и навыка в решении таких задач многие операции выполняются неосознанно. Это пример того, как в результате опыта (навыка) первоначально рациональное переходит в интуитивное, осуществляющееся в процессе игры без осознанных рассуждений и расчетов. Подобное явление имеет место и при решении других задач — в карточных играх, в домино или в шахматах. Опытный шахматист не обдумывает сознательно все возможные в данной позиции ходы, как делает начинающий шахматист.

Из приведенного анализа игры в 5 видно, что для решения задач по правилам этой игры существенно взаимное расположение фишек в начальной и конечной позициях, т. е. отношения между фишками, определяющие структуру задачи и ей соответствующую структуру решения.

Форма, цвет, конкретная нумерация фишек для решения задачи не имеют значения и, казалось бы, не должны сказываться на процессе его отыскания. Однако, как показывают психологические эксперименты \*), изменение этой внешней, несущественной для формального отыскания решения стороны игры заметно влияет на восприятие игры испытуемыми и на выработку стратегии поиска решения. Эти изменения выводят испытуемого из привычной для него обстановки, нарушают выработанный стереотип и служат своеобразной маскировкой, мешающей распознать в данной позиции то общее, уже знакомое, что позволяет использовать выработанные приемы и навыки.

Эта маскировка настолько сильна, что часто те испытуемые, которые успешно решают стандартные задачи, теряются и даже отказываются решать эквивалентные задачи — задачи с измененной (нестандартной) конечной позицией, не узнавая известные им по прежним экспериментам структуры. Однако по мере приобретения опыта в решении таких задач испытуемый распознает в них знакомые структуры и так же успешно решает их.

Таким образом, мы сталкиваемся здесь с положением, когда в множестве эквивалентных задач, отличающихся внешней формой, различными внешними ситуациями, остается неизменной

---

\*) См., например, статью В. Пушкина и В. Фетисова (1969).

глубинная структура, основные отношения между элементами, так сказать, «тема» задачи. Иными словами, мы имеем здесь дело с переносом (транспозицией) неизменных отношений, приемов решения при варьировании ситуаций, т. е. с тем же положением, которое было описано выше (см. § 3.4) при рассмотрении вариаций мелодий.

Инвариантами здесь служат структура позиции, взаимное расположение фишек в начальной и конечной позициях, а также определяемые ими тип задач, структура решения и число ходов в оптимальном решении. Приведенная выше запись структуры решения одинакова для всех 120 эквивалентных между собой задач. Однако если эти решения записывать в виде последовательности ходов (как показано в § 6.3), то ничего общего между ними не видно.

Как уже отмечалось, аналогичное явление наблюдается и в музыке — при восприятии транспонированных мелодий (при прослушивании и записывании их), когда все они воспринимаются на слух как одна и та же мелодия, но при записи их в общепринятом виде ничего общего между ними не видно.

При выработке стратегии решения эквивалентных задач осуществляется транспозиция структуры решения из одних условий (игра в 5 со стандартной конечной позицией) в другие (игра в 5 с измененной конечной позицией). Именно наличием инвариантов и переносом их в варьированную ситуацию можно объяснить то, что при решении эквивалентных задач испытуемый после некоторого опыта обнаруживает общность их со стандартными задачами, их сходство.

Однако вначале этому сильно препятствуют трансформанты и константы — т. е. те элементы игры, которые изменяются при переходе от стандартных задач к эквивалентным. Они маскируют инварианты и мешают узнат в эквивалентных задачах привычные связи. Трансформантами здесь являются конечные позиции, способы обозначения фишек, четность позиции и др. В качестве констант могут выступать форма фишек, их цвет и другие их особенности, а также определенное расположение номеров фишек конечной позиции и т. п. В каждой серии эквивалентных между собой задач реализуется определенный набор констант.

При решении эквивалентных задач происходит установление общности структур в условиях маскировки, т. е. в условиях помех, которые создаются новыми, непривычными элементами. На преодоление их требуются определенные умственные усилия, большие или меньшие в зависимости от того или другого набора маскирующих элементов. Представляет интерес исследование формальной зависимости степени близости различных эквивалентных и стандартных задач от набора изменяющихся элементов — трансформант и констант.

## АНАЛОГИИ И ВАРЬИРОВАННЫЕ СИТУАЦИИ

---

### § 7.1. Инвариантные структуры в разных объектах исследования

*Аналогии и инвариантные структуры. Аналогии при кодировании разных объектов — транспонирование мелодий и эквивалентных задач игры в 5. Существенные элементы процесса творчества.*

При рассмотрении задач, относящихся к различным видам человеческой деятельности, обнаруживается много общего. По-видимому, при переходе от одного вида деятельности к другому человек интуитивно, неосознанно пользуется методом аналогии, формируя и используя некоторые инвариантные структуры. Носятели сходства разных объектов, некоего общего свойства — аналогии — это инварианты разных ситуаций, замаскированные до поры до времени (пока аналогия не будет обнаружена) специфическими характеристиками этих разных объектов.

Рассмотрим, например, два разных вида эвристической деятельности человека — сочинение мелодий и игру в 5. Для простоты будем рассматривать структуры решений задач игры в 5 и мелодий, представленные в закодированном виде.

Как уже говорилось в § 3.1, варьирование мелодии наблюдается при исполнении или восприятии одной и той же мелодии, воспроизведенной на разных музыкальных инструментах или разными голосами, когда звуки, их тембровая окраска, оказываются различными. Это, однако, наиболее простой вид варьирования, когда маскирующее действие разных тембров при восприятии мелодии проявляется весьма слабо.

Аналогичная ситуация характерна для таких изменений игры в 5, как пользование внешне различными атрибутами этой игры — досками и наборами фишек, например, разной величины, сделанными из различных материалов; разного цвета, формы и т. п.

Тембровые различия не сказываются на нотной записи мелодии; по одной и той же записи мелодию можно воспроизвести на самых разных музыкальных инструментах и разными голосами. Один из наиболее простых видов варьирования мелодии, отражающихся в ее нотной записи, — транспонирование мелодии в другую тональность, уже рассмотренное в самом начале книги (см. рис. 1.1). В этом случае варьированная мелодия записывает-

ся и исполняется на несколько тонов выше или ниже исходной. Наиболее простым является транспонирование мелодии на октаву.

Аналогично, и в игре в 5 такой структурой, подобной записи транспонированных мелодий, будет запись решений эквивалентных между собой задач игры в 5 в закодированном виде (см. § 6.7). Она не зависит от размеров, материала, цвета доски для игры, а также от размеров, формы, цвета и других характеристик фишек.

Рассмотренная аналогия относится лишь к способам записи транспонированных мелодий и эквивалентных задач игры в 5. На большее эта аналогия не распространяется.

Для электронной вычислительной машины весьма простым делом (в отношении составления соответствующей программы) является решение эквивалентных задач, если известно решение стандартной задачи; оно сводится к перекодированию стандартной задачи. Этот процесс аналогичен транспонированию музыкальных композиций из одной тональности в другую. Из теории музыки известно всего 24 (12 мажорных и 12 минорных) различных тональностей, не включая энгармонических тональностей, получающихся в результате приравнивания и отождествления звуков, имеющих одинаковую высоту, но разные названия: например, *си-диэз* — *до* — *ре-дубль бемоль* или *до-диэз* — *ре-бемоль* и др. Учитывая это, можно составить (теоретически) бесчисленное множество различных энгармонических тональностей.

Однако при исследовании восприятия игры в 5, в частности эквивалентных задач, а также при моделировании его прежде всего имеется в виду не перекодирование стандартной задачи или получение решения эквивалентной задачи, а решение ее испытуемым в эксперименте и выявление соответствующих закономерностей, относящихся к области принятия решений. При этом у испытуемого возникают определенные трудности, связанные не с перекодированием известной ему задачи, а прежде всего — с отысканием общей структуры решения, аналогий, ассоциаций, облегчающих нахождение решения. В некотором роде аналогичные проблемы возникают в музыке при транспонировании музыкальной композиции: музыкантам известно, что если некоторую мелодию они могут спеть или сыграть на рояле, кларнете и т. п., то транспонированную мелодию гораздо легче спеть, чем сыграть на каком-нибудь музыкальном инструменте.

При записи транспонированных мелодий общее между ними проявляется в тождественности их мелодических линий на нотоносце — ведь ключевые знаки (диезы или бемоли), изменяющиеся при транспонировании, обычно выписываются не непосредственно перед нотами, а при ключе, и относятся они ко всем нотам, имеющим название той ноты, на месте которой находится данный знак.

Рассмотрим разные способы записи решений эквивалентных между собой задач игры в 5 и записи транспонированных мелодий. Эти способы записи представляют собой разные способы кодирования одного и того же содержания.

Запишем решение двух эквивалентных между собой задач игры в 5 (стандартная задача с начальной позицией  $\begin{smallmatrix} 1 & 3 & 4 \\ 2 & 5 \end{smallmatrix}$  и конечной позицией  $\begin{smallmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 \end{smallmatrix}$ , эквивалентная ей задача с начальной позицией  $\begin{smallmatrix} 3 & 4 & 5 \\ 2 & 1 \end{smallmatrix}$  и конечной позицией  $\begin{smallmatrix} 3 & 2 & 4 \\ 5 & 1 \end{smallmatrix}$ ), используя четыре способа кодирования, приведенные в § 6.2 и 6.7:

- 1) последовательность ходов;
- 2) последовательность позиций;
- 3) первый способ кодирования решений, фиксирующий промежуточные позиции (см. § 6.2);
- 4) второй способ кодирования решений, без обозначения промежуточных позиций (см. § 6.7).

Эти четыре способа кодирования стандартной задачи а) и эквивалентной ей задачи б) в указанной здесь последовательности представлены на табл. 7.1.

Аналогично запишем две транспонированные между собой мелодии романса А. Обухова «Калинка» также четырьмя способами кодирования, принятыми в музыковедении (рис. 7.1):

- 1) последовательностью высот нот, употребляя буквенные названия с указанием номера октавы верхним индексом;
- 2) записью нот на нотоносце, с указанием знаков повышения и понижения тона (диез и bemоль) не в ключе, а перед каждой нотой, как принято, например, при записи оркестровых партий некоторых музыкальных инструментов;
- 3) последовательностью нот на нотоносце со знаками в ключе, когда частично отражается специфика тональности;
- 4) последовательностью интервалов.

Предварительно сделаем некоторые замечания относительно кодирования мелодии последовательностью интервалов. Используем введенный в § 5.1 способ кодирования интервалов: 0 — прима, 1 — секунда, 2 — терция, 3 — квarta, 4 — квинта, 5 — секста, 6 — септима, 7 — октава. Музыкальный интервал между текущей нотой и нотой, непосредственно предшествующей текущей ноте, может быть представлен двумя способами: либо *назначением интервала* (прима, уменьшенная терция, большая секунда и т. п.), либо *числом тонов* (или полутонов). Следуя И. В. Способину (1951), будем эти способы называть соответственно *ступеневым* или *тоновым выражением*. В музыковедении приняты определенные соотношения между ступеневым и тоновым выражениями интервалов (табл. 7.2) (здесь приняты также сокращения: *м* — малый,

*б* — большой, *ч* — чистый, *ум* — уменьшенный, *ув* — увеличенный, *т* — целый тон).

При кодировании мелодии последовательностью интервалов, небезразлично, как обозначить эти интервалы — в ступеневом или тоновом выражении. Имеются существенные различия между ними.

Таблица 7.1

1)

а: 1 3 4 ф1 ф3 ф4 ф5 ф2 ф4 ф3 ф1 ф4 ф2 ф5 ф3 ф2 ф4 1 2 3  
2 5 4 5

б: 3 4 5 ф3 ф4 ф5 ф1 ф2 ф5 ф4 ф3 ф5 ф2 ф1 ф4 ф2 ф5 3 2 4  
2 1 5 1

2)

а: 1 3 4 3 4 3 4 3 4 5 3 4 5 3 5 3 5  
2 5 1 2 5 1 2 5 1 2 1 2 1 4 2 1 4 2  
1 3 5 1 3 5 1 3 1 3 1 3 1 2 3 1 2 3  
4 2 4 2 4 2 4 2 5 4 2 5 4 5 4 5

б: 3 4 5 4 5 4 5 4 5 4 5 1 4 5 1 4 1  
2 1 3 2 1 3 2 1 3 2 1 3 2 3 2 3 5 2 3 5 2  
3 4 1 3 4 1 3 4 1 3 4 3 4 3 2 4 3 2 4  
5 2 5 2 5 2 5 2 1 5 2 1 5 1 5 1

3)

а: 1 3 4 ← 3 | 2 4 ← 3 5 → 1 | 3 5 → 1 2 3 ← 1 2 3  
2 5 2 1 | 2 5 4 1 4 2 3 4 | 2 4 4 5 1 4 5

б: 3 4 5 ← 4 | 5 ← 4 1 → 3 | 4 1 → 3 2 4 ← 3 2 4  
2 1 2 3 | 2 1 4 3 5 2 3 5 | 2 4 5 1 1 5 1

4)

а: 1 3 4 1 2 3 ← | ← | → | → | ← |

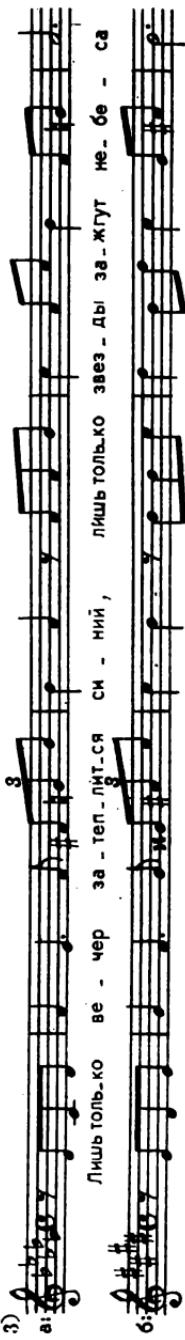
б: 3 4 5 3 2 4 ← | ← | → | → | ← |

Так, при записи в ступеневом виде можно однозначно восстановить последовательность нот, вписанную в определенную тональность. При записи же в тоновом виде (числом тонов) мелодия хотя и звучит правильно, однако ноты, обозначающие звуки этой мелодии, не всегда можно восстановить и, таким образом, утрачивается ладотональное свойство восстановленной мелодии. Причина этого заключается в энгармонизме звуков, т. е. в том, что звуки, имеющие одну и ту же высоту, могут иметь различные названия, как об этом уже говорилось ранее.

Этим обусловлена основная трудность, возникающая при конструировании устройств, которые позволили бы автоматически

1)  $\begin{array}{l} \text{a: } \text{des} \ c \ \text{des} \ | \ f \ \text{es} \ f \ \text{fis} \ g \ b \\ \text{b: } \text{e} \ \text{dis} \ e \ | \ \text{gis} \ \text{fis} \ \text{gis} \ \text{ais} \ \text{cis} \ | \ \text{cis} \ \text{h} \end{array}$

2) 

3) 

4)

**ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ИНТЕРВАЛОВ В СТУПЕНЕВОМ ВЫРАЖЕНИИ**

a:	-1	+1	+4	-2	+2	+1	+1	+3	0	-2	0	0	+2	0	0	+61	+61	-62	+62	-61	-3	+61
b:	-1	+1	+4	-2	+2	+1	+1	+3	0	-2	0	0	+2	0	0	+61	+61	-62	+62	-61	-3	+61

**ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ИНТЕРВАЛОВ В ТОНОВОМ ВЫРАЖЕНИИ (ЧИСЛОМ ПОЛУТОНОВ)**

a:	-1	+1	+4	-2	+2	+1	+1	+3	0	-2	0	0	+2	+2	-4	+4	-2	-5	+2	+1
b:	-1	+1	+4	-2	+2	+1	+1	+3	0	-2	0	0	+2	+2	-4	+4	-2	-5	+2	+1

Рис. 7.1. Четыре способа кодирования кодирования между собой мелодий.

записывать в общепринятой нотации музыкальное сочинение, проигрываемое на рояле или другом музыкальном инструменте.

Сравнивая между собой четыре способа записи решений игры в 5 (табл. 7.1) и мелодий (рис. 7.1), можно легко обнаружить их полную аналогию.

В самом деле, первый и второй способы кодирования не обнаруживают ничего общего между двумя эквивалентными задачами игры в 5 или транспонированными мелодиями; третий способ кодирования обнаруживает общее в некоторой части записи,

Таблица 7.2

Прима	$0 - \text{ч}$	$0 = 0 \text{ m};$	$y\vartheta 0 = 0,5 \text{ m}.$	
Секунда	$1 - y\vartheta m$	$1 = 0 \text{ m};$	$\text{ч} 1 = 0,5 \text{ m};$	$y\vartheta 1 = 1,5 \text{ m}.$
Терция	$2 - y\vartheta m$	$2 = 1 \text{ m};$	$\text{ч} 2 = 1,5 \text{ m};$	$y\vartheta 2 = 2,5 \text{ m}.$
Квarta	$3 - y\vartheta m$	$3 = 2 \text{ m};$	$\text{ч} 3 = 2,5 \text{ m};$	$y\vartheta 3 = 3 \text{ m}$ (тритон).
Квинта	$4 - y\vartheta m$	$4 = 3 \text{ m};$	$\text{ч} 4 = 3,5 \text{ m};$	$y\vartheta 4 = 4 \text{ m}.$
Секста	$5 - y\vartheta m$	$5 = 3,5 \text{ m};$	$\text{ч} 5 = 4 \text{ m};$	$y\vartheta 5 = 5 \text{ m}.$
Септима	$6 - y\vartheta m$	$6 = 4,5 \text{ m};$	$\text{ч} 6 = 5 \text{ m};$	$y\vartheta 6 = 6 \text{ m}.$
Октава	$7 - y\vartheta m$	$7 = 5,5 \text{ m};$	$\text{ч} 7 = 6 \text{ m};$	$y\vartheta 7 = 6,5 \text{ m}.$

а именно в последовательности стрелок с числами и фиксированием вертикалей при решении игры в 5 и в мелодическом рисунке, хотя как последовательности промежуточных позиций, так и последовательности высот нот не содержат ничего похожего; четвертый способ кодирования дает совершенно одинаковую запись как для решений двух эквивалентных задач игры в 5, так и для двух транспонированных между собой мелодий.

Подобную аналогию можно усмотреть и при рассмотрении других, закономерностей.

При исследовании и моделировании творческих процессов необходимо учитывать, что в процессе решения творческих задач, а также при восприятии результата этого процесса проявляется иерархия понятий (представлений), рассмотренная в § 2.5. Она заключается в том, что человек оперирует такими понятиями  $p_v$ , которые являются элементами данного процесса как такового, а не простейшими элементами исследуемого объекта, которые можно обнаружить при его анализе. Образуя определенную структуру, присущую данному процессу, элементы  $p_v$  сохраняют некий образ этого процесса и являются более сложными понятиями, чем те простейшие элементарные понятия низшего уровня иерархии  $p_v$ , из которых составлены понятия  $p_v$ .

Приведем примеры таких понятий  $p_v$ , присущих рассмотренным выше разным процессам творческой деятельности, и их составляющих понятий низшего уровня  $p_v$ , на которые прежде всего обращается внимание при первоначальном исследовании.

*Интонация* при сочинении мелодии — наименьший элемент мелодии, имеющий выразительное значение, а не нота или ее про-

стейшие компоненты — высота, длительность, а также интервал (см. § 5.1) (Р. Х. Зарипов, 1983).

*Элементарное переплетение* при выплетании кружев, а не простейшие операции — вращение и перекрещивание пары коклюшек (см. § 2.5).

*Элементарные приемы* при решении задач игры в 5 — вращение по большому или малому кругу, а не отдельный ход фишки (см. § 6.4).

В процессе творческой деятельности человек не оперирует понятиями низшего уровня иерархии, ибо при этом разрушается впечатление целостности самого процесса и его продукта, затушевываясь несущественными для него деталями. Поэтому отыскание структуры процесса, существенных для него элементарных понятий является важным этапом его исследования. Моделирование исследуемого объекта позволяет подтвердить гипотезы о наличии таких понятий  $p_v$  и сведении их к простейшим понятиям  $p_n$ .

## § 7.2. Об алгоритмическом характере поведения слушателя и сочинителя музыки

*Роль интуиции при сочинении мелодии. Стабильность традиционной формы массовой песни. Интуиция — невскрытая закономерность. Моделирование простых видов деятельности — путь к выявлению закономерностей интуиции.*

Транспозиция инвариантных элементов проявляется в самых разных видах человеческой деятельности. На ней, в частности, основаны механизмы таких форм продуктивной человеческой деятельности, как интуиция подражания, интуиция узнавания и распознавания образов.

Весьма наглядно механизм интуиции подражания проявляется в творчестве композиторов-песенников. Более того, если любителю музыки, даже не знакомому с музыкальной грамотой, предложить сочинить песню — т. е. мелодию на заданные стихи, — то эта мелодия будет (подобно машинным мелодиям, моделирующим массовые песни) во многом напоминать знакомые нам мелодии. В ней будут четко соблюдаться общие закономерности и принципы построения мелодии массовой песни — ее синтаксическая структура. Мелодия, как правило, будет состоять из 8 или 16 тактов, будут соблюдены правила ограничения диапазона, волнообразность мелодической линии, ладовые тяготения, повторность мелодических и ритмических фигур, расчлененность мелодии на отдельные, вполне определенные построения — предложения, фразы и мотивы, ладотональная структура. Короче говоря, мелодия будет удовлетворять закономерностям композиции, о которых сочинитель этой музыки и не подозревает. Он будет немало удив-

лен, узнав, что его мелодия удовлетворяет такому множеству правил и закономерностей. И в этом четко проявляется механизм интуиции подражания, основанный на предшествующем опыте слушания подобной музыки.

При сочинении новой музыки, новой песни композитор сталкивается с двумя противоречивыми сторонами.

Мелодия должна быть новой — отличной от всех известных уже песен, иначе она будет восприниматься как пластика, или простое заимствование. И новизна (в пределах традиционной музыкальной системы) проявляется в определенных сочетаниях составляющих ее элементов, а также в привлечении новых музыкальных средств. Но массовая песня предназначена для широких масс и для исполнения, в частности людьми, не искушенными в музыке, или музыкально не подготовленными. Они — по самой идее массовой песни — должны эту песню легко воспринимать, запоминать и исполнять. Привлечение же новых музыкальных средств, новых непривычных структур — таких, например, как дodeкафония, алеаторика, — препятствует этому. Додекафонную мелодию очень трудно спеть без специальной подготовки, хотя бы потому, что в ней нет ладово устойчивых звуков. А эти звуки играют большую роль в исполнении песни: все знают, как легко петь детские песни, отличающиеся обилием ладово устойчивых звуков. Отсюда следует: мелодия песни должна быть синтаксически простой, что проявляется в традиционности приемов сочинения, в инвариантности музыкальных средств и структуры. А это сильно ограничивает разнообразие массовой песенной мелодии.

К таким инвариантным музыкальным средствам, которые композиторы разных эпох широко используют в своем творчестве, относятся, в частности, и так называемые *бытующие интонации* — устойчивые интонационные формулы, имеющие важное значение для понимания, узнавания и доступности музыки. Это те из всех возможных интонаций, которые, будучи наиболее приемлемыми для слуха и удобными для пения, отбирались веками из музыки многих народов (Л. Алексеева, 1980; Р. Х. Зарипов, 1983).

Уже на протяжении многих последних десятилетий, если не столетий, массовая песня мало изменила свой синтаксис. Более того, установилась определенная стабильная, или стереотипная, форма массовой песни — ее структура, средства выразительности и язык. (Анализу разных сторон массовой песни посвящена книга Л. В. Кулаковского, 1962.)

Таким образом, мелодию новой массовой песни характеризуют следующие основные качества: инвариантная синтаксическая структура, новые элементы и сочетания элементов — ее трансформанты, а также отличительные особенности стиля песни — константы мелодии.

Эксперименты по моделированию на электронной вычислительной машине песенных мелодий показывают, что машина уже

теперь успешно справляется с этим видом музыкального творчества. Рассмотрим некоторые особенности восприятия музыки. Чтобы песня легко воспринималась, в ней должно содержаться много традиционных элементов, знакомых синтаксических структур, в частности повторы — точные или видоизмененные — различных элементов, облегчающих восприятие и усвоение всей мелодии в целом. Иначе мелодия, синтезированная лишь (или преимущественно) из новых структур, не будет восприниматься как мелодия.

Восприятие музыки, в частности мелодии, основано на интуиции. Известно, что многие из тех, кто неспособен даже правильно пропеть какую-нибудь мелодию, оказываются в состоянии отличить, например, грузинскую мелодию от украинской. По каким признакам — они не знают, но делают это безошибочно. Здесь проявляется механизм интуиции узнавания или распознавания музыкальных образов. Эти механизмы интуиции формируются на основе предшествующего опыта при прослушивании такого рода мелодий, в результате чего и организуются структуры этих музыкальных образов. Ибо понятно, что человек, ранее никогда не слышавший мелодий песен или грузинских и украинских мелодий, не сможет успешно решить задачи по их распознаванию.

В рассмотренных выше экспериментах по сочинению мелодий — моделей мелодий массовых песен — электронная вычислительная машина моделирует работу механизма интуиции подражания. Однако наряду с традиционными формами и средствами, такими как инвариантные структуры, используются и новые комбинации мелодических и ритмических фигур (обусловленные генератором случайных чисел). Это вместе с вышеизложенными положениями относительно сочинения новых массовых песен дает основание полагать, что при моделировании песенных мелодий (разумеется, в рамках заданного жанра, музыкальной эпохи и определенных музыкально-стилистических средств) уже теперь машина может быть серьезным «оперником» композиторов-песенников, работающих в разных жанрах массовой песни.

Многие композиторы — осознанно или неосознанно — это понимают, и их стихийный протест против машинной музыки (даже когда они не знают, что такое машинная музыка), по-видимому, обусловлен этим обстоятельством.

Результаты, полученные при моделировании творческой (продуктивной, эвристической) деятельности на электронной вычислительной машине, заставляют по-новому взглянуть на различные стороны этой деятельности. Найденные результаты во многом меняют традиционные представления о характере и природе творчества.

Так, еще недавно (до использования вычислительных машин) сочинение музыки и подобные творческие процессы считались привилегией лишь высшего проявления человеческого духа, с его способностью к озарению, порывам вдохновения и т. п. Теперь,

после ознакомления с машинными композициями и другими результатами моделирования творчества, ясно, что и алгоритм порождает такую же деятельность. Кроме того, эти и подобные им эксперименты подтверждают подвижность границы между знанием и незнанием, между алгоритмически описанным и «чистым» творчеством — тем, что еще пока не поддается алгоритмизации и совершается по интуиции. Через интуицию в сознании творца формируются не всегда осознаваемые им структуры и закономерности создаваемого произведения. Это сказывается и на структуре произведения, на его общих — или видовых — закономерностях (проявление интуиции подражания при переносе инвариантов некоторого вида этого объекта), и на стилевых особенностях произведения, когда некая скрытая закономерность проходит через всю творческую деятельность автора и объективно обнаруживается в его произведениях как творческая индивидуальность, проявление свойственных автору специфических для него констант. Но если есть интуиция, то имеются и закономерности, на которые она опирается, независимо от того, в какой области человеческой деятельности она проявляется, ибо интуиция и есть объективно существующая, но невскрытая закономерность. Открыть, познать и формально (точно и недвусмысленно) описать эти закономерности — задача науки. И она будет решена, сколь бы сложной ни представлялась. В разрешение этой задачи вносит свой вклад и метод моделирования на электронной вычислительной машине — объективный (межличностный) метод подтверждения гипотез о принципах и закономерностях исследуемого объекта.

## ДОПОЛНЕНИЕ

М. Г. Гаазе-Рапопорт

### ПОИСК ВАРИАНТОВ В СОЧИНЕНИИ СКАЗОК \*)

---

Вряд ли у кого-нибудь могут возникнуть сомнения, что сочинение литературных произведений и в том числе сказок является одним из видов творческой деятельности. Несмотря на то, что этот вид творчества существенно отличается как от сочинения музыкальных вариаций, так и от поиска решений при игре в 5, и в нем поиск вариантов является важной составляющей частью всего процесса творчества. Ниже мы попытаемся это показать. Мы не рассматривали сочинение сложных музыкальных произведений — симфоний, сонат, концертов, а ограничились рассмотрением сочинения более простых музыкальных произведений — мелодий массовых песен. И здесь мы не будем рассматривать процесс сочинения произвольных литературных произведений, а ограничимся лишь их определенным видом — волшебными сказками.

Чем проще объект исследования, тем легче в нем выделить основные, глубинные закономерности, важнейшие принципиальные особенности, не погружаясь в многочисленные частные особенности и детали. Здесь мы полностью солидаризируемся с Минским, который писал: «Игры и математические задачи берутся не потому, что они просты и ясны, а потому, что они при минимальных начальных структурах дают нам наибольшую сложность, так что мы можем заняться некоторыми действительно трудными ситуациями, относительно мало отвлекаясь на вопросы программирования» (Минский М., 1968).

#### § Д.1. Общая структура волшебной сказки

Формальное изучение сказок началось еще в конце 20-х годов нашего века, когда советский литературовед В. Пропп (1928) на основании исследования структуры волшебных сказок создал функциональную модель любой сказки подобного типа. Работа эта намного опередила свое время и не привлекла в те годы никакого внимания. Второе ее рождение (В. Пропп, 1969) произошло в период, когда вычислительная техника стремительно изменяла точки зрения представителей многих профессий и наук на суть методологии и характер используемых методов.

---

\*) В основе дополнения лежит работа М. Г. Гаазе-Рапопорта, Д. А. Поспелова, Е. Т. Семеновой (1980).

Идеи В. Проппа были развиты Е. Мелетинским (1958), К. Бремоном (1972), Н. Рошияну (1974) и др. В частности, развитие этих идей К. Бремоном послужило основой для создания Клейном в ФРГ программы сочинения волшебных сказок, с помощью которой ЭВМ порождала тексты вида: «Моревичи жили в отдаленном районе. Отец был Ерема. Мать была Василиса. Старший сын был Балдак. Средний сын был Марко. Младший сын был Борис. Николай тоже жил там. Николай был рожден чудесным образом. У Балдака был волшебный конь. В отдаленном районе появился медведь. Медведь за-владел волшебным конем...» и т. д.

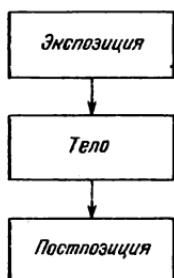


Рис. Д.1. Структура традиционной волшебной сказки.

В настоящее время исследования по изучению волшебных сказок и использованию ЭВМ для сочинения их продолжаются и входят в более широкое направление по созданию программ для ЭВМ, порождающих осмыслиенные тексты.

Основываясь на этих работах, усиливающих формальную сторону идей В. Проппа и его последователей, можно формально описать структуру сказки и представить процесс ее сочинения как поиск и формирование вариантов в рамках этой достаточно жесткой структуры.

Традиционная волшебная сказка имеет структуру, представленную на рис. Д.1, и состоит из следующих трех последовательных частей: *экспозиции* — начальной части сказки, *тела* — основного содержания ее и *постпозиции* — завершающей части, которой оканчивается сказка.

Задачей экспозиции является сообщение читателю или слушателю необходимых начальных сведений и фона, на котором развертывается сказка, позволяющая ощутить необходимость дальнейшего развертывания сюжета. Тело сказки — ее основная часть, содержащая развертывание сюжета со всеми сюжетными ходами и отступлениями. Постпозиция представляет собой описание некоторой итоговой ситуации, возникающей после окончания всех действий персонажей сказки, а также одну из традиционных формул окончания.

**Экспозиция.** Начальная часть сказки, весьма разнообразная по содержанию, представляет собой ограниченное множество типовых структур, подавляющее большинство которых может быть порождено графом, изображенным на рис. Д. 2. Граф, порождающий конкретную реализацию структуры экспозиции, содержит 8 вершин, среди которых начальной вершиной (01) является традиционная формула начала, например: «В некотором царстве, некотором государстве», а конечной (08) — собственно завязка, например: «и пошел он (герой) счастья искать».

Любой маршрут в порождающем графе от вершины 01 к вершине 08 представляет собой реализацию одной из возможных эк-

спозиций. Заметим, что в ряде выбранных маршрутов — структур экспозиций — отдельные вершины могут вырождаться и даже полностью исключаться. Так, например, в сказке № 214 (А. Афанасьев, 1957) вся экспозиция заключена в предложении: «Пошел отставной солдат Тарабанов странствовать...», представляющем собой

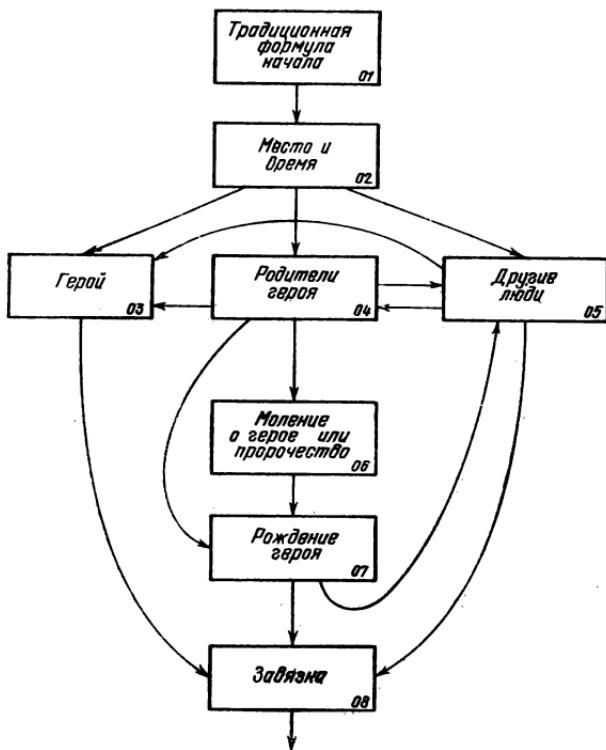


Рис. Д.2. Структура экспозиции сказки.

заязку (08) с указанием имени героя. В сказке № 235 (А. Афанасьев, 1957) экспозиция начинается словами: «Был-жил старик со старухой. У них были три дочери...», что соответствует структуре 01-04-05..., в которой вершине 01 сопоставляются слова «Был-жил», а вершина 02 отсутствует.

В структуре экспозиции могут отсутствовать и другие вершины, например 06 (моление о ребенке или пророчество), 05 (другие люди) и. т. п.

В рамках таких представлений каждая выбранная структура экспозиции (маршрут на порождающем графе) является инвариантом для сказки или группы сказок, а конкретное заполнение, реализация экспозиции, сводится к *вариациям* возможных заполнений вершин этого графа.

*Тело сказки.* Основное содержание сказки — ее тело — имеет простую структуру, изображенную на рис. Д.3. Как видно из рисунка, тело сказки представляет собой последовательность встреч



### Рис. Д.3. Структура тела сказки.



Рис. Д.4. Структура постпозиции сказки.

тательных целей и каждый ход представля-  
ет собой самостоятельную сказку, вкрапленную в основную линию  
(тело) героя.

**Постпозиция.** Заключительная часть сказки, ее постпозиция, структура которой изображена на рис. Д.4, очень проста. Она со-

стоит из награды героя (богатство, свадьба), заключения сказочника, представляющего собой мораль сказки, и традиционной формулы конца, например: «Я там был, мед, пиво пил, по усам текло, в рот не попало». Иногда постпозиция, так же как и экспозиция, усекается. Чаще всего такое усечение состоит в исключении заключения сказочника, а иногда и традиционной формулы конца. Так, сказка № 121 (А. Афанасьев, 1957) содержит следующую постпозицию: «Царь обрадовался и выдал за него (героя) свою дочь».

## § Д.2. Элементы структуры волшебной сказки

Выше описана лишь самая грубая структура волшебной сказки, которая характеризует только общие принципы построения сказки. Однако уже на этом уровне может быть зафиксировано некоторое число параметров, констант; их значения, будучи выбраны, ограничивают множество возможных структур сказок, которые реально могут быть получены в процессе ручного или машинного сочинения. Такими константами, выбираемыми на начальном этапе сочинения, являются:

- конкретная структура экспозиции — фиксированный маршрут на порождающем графе;
- число боковых линий (тел), имеющихся в сказке;
- количество вставных, относительно самостоятельных сказок, входящих в основное тело — тело героя сказки;
- минимальное число встреч в теле сказки.

Выбор конкретных значений этих констант может быть осуществлен как лицом, сочиняющим сказку, так и программным путем в пределах заданных диапазонов, например, с помощью датчика случайных чисел.

Заметим, что описываемый выбор начальных констант полностью аналогичен выбору исходных инвариантов мелодии при ее сочинении (см. гл. 5).

Для того чтобы можно было формализовать получение произвольной структуры сказки или попытаться осуществить ее машинное генерирование необходимо рассмотреть детальнее более мелкие элементы этой структуры. Такие более мелкие и в то же время основные элементы структуры — действующие лица, поступки и встречи. Рассмотрим несколько подробнее эти элементы.

*Действующие лица.* Множество действующих лиц сказок легко разбивается на относительно небольшое количество почти неизменных типов. Список типов действующих лиц сказки (ДЛ) содержит, в частности, следующие основные типы:

Герой — *H*, Антигерой — *A*, Прорицатель — *P*, Даритель — *D*, Помощник — *P*, Антипомощник — *V*, Глупец — *G*, Антидаритель — *W*.

Условно к числу типов действующих лиц будем относить также Награду — *N* и Препятствие — *R*. Из приведенного списка

видно, что среди типов действующих лиц можно выделить две партии: партию героя (герой, помощник, даритель) и партию антигероя (антигерой, антипомощник, или вредитель, и антидаритель). Вне выделенных партий остаются прорицатели, роль которых заключается в сообщении герою или антигерою какой-либо информации, необходимой для развития сюжета; награда — обычно царевна или принцесса, которой добиваются герой и антигерой; глушицы, либо мешающие герою, либо оттеняющие его удачи своими неудачами, а также препятствия, для преодоления которых действующие лица пользуются обычно волшебными средствами, полученными от дарителей. Таким волшебным средством может являться и совет о способе преодоления препятствия.

Конкретные воплощения каждого типа действующих лиц в свою очередь можно задать конечным списком. Так, список антигероев может содержать такие их воплощения, как «злой колдун», «баба-яга», «Кашей бессмертный», «злая мачеха-колдунья» и т. п.

В список возможных воплощений помощников могут входить и следующие: «Сивка-бурка — вещая каурка», «конек-горбунок», «волк», «орел», «заяц», «щука» и т. п. Аналогичным способом составляются и списки воплощений других типов действующих лиц.

Несмотря на довольно большое количество различных воплощений, которые могут быть использованы в сказках, оно конечно, и все подобные списки могут быть составлены вручную и затем введены в память ЭВМ. Существенно заметить, что при реализации процесса построения сюжетной структуры и собственно сочинения сказки из каждого списка выбирается (актуализируется) лишь небольшое число конкретных воплощений. Так, для героя, антигероя и награды всегда используется только одно воплощение, а количество воплощений остальных действующих лиц во всяком случае не превосходит числа встреч, содержащихся в теле сказки. Это позволяет двумя различными путями подойти к выбору актуализированных воплощений: выбирать их заранее до построения структуры сказки, приспособливая затем эту структуру к содержанию списка актуализированных значений воплощений действующих лиц, экономя тем самым оперативную память машины и число обращений к внешней памяти, в которой должна храниться информация об исходных данных для всех возможных для реализации сказок; либо выбирать их последовательно в процессе развертывания сюжетной структуры, что естественно предъявляет повышенные требования к возможностям памяти ЭВМ и ее производительности. Это существенно, так как, помимо самих списков воплощений действующих лиц, необходимо для каждого персонажа, вошедшего в этот список, хранить и сведения о его типовых действиях, возможностях, целях и средствах. Эта информация также представляет собой совокупность списков, хранящихся в памяти машины.

Так, если в качестве помощника выступает «щука», то в перечень ее возможностей могут входить:

- преодоление водного пространства (переправа через него героя);

- поиск волшебного средства, например перстня, на дне моря и пр.

Традиционный характер сказок и связанные с этим ограниченность их лексического материала делают возможным хранение всей необходимой информации в памяти ЭВМ.

*Поступки.* Один из наиболее существенных видов данных, которые необходимо хранить для каждого действующего лица,— информация о их возможных поступках. Можно указать структуры таких типовых поступков, которые могут совершаться данным персонажем. Эти поступки характеризуются некоторыми фреймовыми структурами. В качестве примера рассмотрим фреймы-поступки антигероев и антипомощников, наиболее типичными для которых являются *похищение* и *убийство*. Эти фреймы могут быть представлены следующим образом:

*похищение* = {<кто> <кого> <с помощью чего> <откуда> <куда> <зачем>},  
*убийство* = {<исполнитель> <кого> <как> <где> <когда> <зачем>}.

Заметим, что часть позиций фреймов при их актуализации может оказаться пустой.

Список фреймов-поступков также может быть составлен заранее и помещен в память ЭВМ.

Помимо поступков, каждый персонаж сказки может быть охарактеризован конечным набором типовых характеристик. Так, помощник конь обычно имеет имя «Сивка-бурка — вещая каурка». О нем, как правило, говорится: «Бежит, земля дрожит». «Баба-яга» в подавляющем большинстве сказок «старая и беззубая» или «седая и беззубая», «на печи лежит», живет в «домике на куриных ножках» и т. п. Наличие таких типовых характеристик позволяет создать для каждого персонажа свой банк описаний, данные которого могут быть использованы в соответствующем месте сказки, как правило, при описании встреч. Это использование аналогично аранжировке мелодии, что тоже осуществляется путем выбора некоторых вариантов из стандартного набора возможных.

*Встречи.* Как уже указывалось, встречи являются основным элементом любой сказки. Они следуют одна за другой, будучи относительно слабо сцеплены друг с другом. Часто в сказке нельзя уловить какой-либо логической обоснованности в последовательности встреч. Их появление мотивируется лишь общим замыслом сказки, стремлением показать удачливость героя в достижении цели или подчеркнуть трудности в решении основной задачи. Конечность типов действующих лиц позволяет выделить и проанализировать заранее конечное число типов встреч. Количество и типы встреч характеризуются треугольной таблицей, из которой видно,

что существует всего 27 типов встреч, исключая встречи с препятствием, не показанные в таблице. Каждый тип встречи характеризуется теми поступками, которые могут совершать ее участники. Набор таких поступков конечен и для волшебных сказок невелик. Так, встреча *НД* (героя с дарителем) может окончиться

Таблица

Действующее лицо	С кем может встретиться						
<i>H</i>	<i>A</i>	<i>P</i>	<i>D</i>	<i>П</i>	<i>V</i>	<i>N</i>	<i>G</i>
<i>A</i>		<i>P</i>		<i>П</i>	<i>V</i>	<i>N</i>	<i>G</i>
<i>P</i>					<i>N</i>	<i>G</i>	
<i>D</i>				<i>П</i>		<i>N</i>	
<i>П</i>					<i>V</i>	<i>N</i>	<i>W</i>
<i>V</i>						<i>N</i>	<i>G</i>
<i>N</i>						<i>G</i>	<i>W</i>
<i>G</i>							<i>W</i>

лишь тем, что даритель совершил один из трех возможных поступков: либо передаст герою определенное волшебное средство, либо даст герою помощника, либо, наконец, даст ему совет о дальнейшем поведении. Встреча *HA* (героя и антигероя) приводит либо к борьбе, в которой побеждает *H* или *A*, либо к угрозам со стороны *A*, либо к загадыванию герою загадки. Аналогично обстоит дело и с другими встречами.

Конкретные виды результатов встреч, например виды даров: клубок ниток, указывающий дорогу, ковер-самолет и т. п., определяются актуализированным «значением» участника встречи (конкретным именем ранее выбранного персонажа), и для каждого из них составляют небольшой фиксированный набор. Выше уже отмечалось, что поступки во время встреч задаются в виде фреймов (похищение, борьба, дарение и т. п.), и поэтому все встречи генерируются по одному стандартному плану: выбор участников встречи, их типовые характеристики, поступки. Заметим, что, хотя, как правило, встречи слабо связаны между собой, их число и последовательность в теле сказки не полностью произвольны. Так, например, если произошло несколько встреч с помощниками или получено несколько волшебных средств, то из этого следует, что далее в теле сказки должно появиться не меньшее число встреч с препятствиями, которые с помощью этих волшебных средств или помощников должен преодолеть герой. Более того, конкретный выбор помощника или волшебного средства ограничивает набор тех препятствий, которые после этого выбора могут быть преодолены. Так, выше уже отмечалось, что если помощником оказалась «щу-

ка», то препятствие будет связано с водной средой. Аналогично, если волшебным средством будет дубинка, то препятствием окажется встреча с антигероем или с антидарилем (вредителем), в борьбе с которыми дубинка обеспечит победу. Заметим также, что речь может идти не только о препятствиях, преодолеваемых героем, но и о препятствиях, создаваемых преследующим героя антигероем или вредителем (антидарилем). Примером такого волшебного средства является волшебный платочек, взмахнув которым, герой создает трудно преодолимое препятствие для преследующего (дремучий лес или водную гладь).

Такими же особенностями, несколько сокращающими случайный перебор при движении по телу сказки, обладают и некоторые другие типы встреч.

*Соединительные элементы.* Соединительные элементы представляют собой наиболее простые и бедные части тела сказки. Обычно они состоят из одного предложения вида: «Идет он и видит»; «сел он на <волшебное средство> и понесло его <волшебное средство> к...»; «долго ли, коротко ли шел он и наконец увидел» и т. п.

Небольшой набор возможных соединительных средств составляется заранее и по ходу развертывания сказки из него выбирается подходящая конструкция.

### § Д.3. Структура алгоритма порождения сказки

Ниже мы опишем одну из возможных структур алгоритма сочинения волшебной сказки. Алгоритм этот может быть реализован как вручную, при написании новой сказки, так и с помощью ЭВМ (детали возможной машинной организации см. в работе М. Г. Газе-Рапопорта, Д. А. Поспелова, Е. Т. Семеновой, 1980).

*Исходная информация.* Исходная информация представляет собой упорядоченную в виде системы списков лексику, на базе которой сочиняется сказка. Богатство и полнота лексики определяют разнообразие сказок, которые могут генерироваться с помощью этого алгоритма. К числу объектов, образующих исходную информацию, относятся:

Перечень типов действующих лиц.

Список возможных типов встреч.

Перечень персонажей — воплощений каждого типа действующих лиц.

Списки возможных поступков каждого действующего лица (фреймов).

Перечень типовых характеристик персонажей.

Список возможных соединительных элементов.

Перечень правил-ограничений, связывающих некоторые типы встреч.

Граф, порождающий структуру экспозиции.

Список типовых завязок.

Перечень возможных постпозиций (без традиционного окончания).

Список возможных традиционных окончаний сказки и некоторые другие.

Этап 1. На первом этапе сочинения сказки в результате случайного выбора устанавливается конкретная структура экспози-

ции (маршрут на порождающем графе) и выбираются значения основных констант сказки, перечисленных в начале § Д.2.

Выбор значений этих констант осуществляется в пределах заданного диапазона случайным образом. Заметим, что число ходов (боковых линий), представляющих собой вариации одного сюжета с различными действующими лицами (глупцами и героем), обычно бывает равно трем.

**Этап 2.** На втором этапе сочинения вначале осуществляется анализ выбранной структуры экспозиции, в результате чего путем последовательного просмотра вершин, входящих в эту структуру, устанавливается наличие других (кроме героя и антигероя) действующих лиц сказки, которыми на этом этапе могут быть глупцы (например, братья героя) или награда (например, царская дочь). На этом же этапе осуществляется случайный выбор реализаций установленных действующих лиц из списков возможных. Для каждого действующего лица, уже конкретного, формулируется начальная информация об их целях и знаниях. Так, если в экспозиции говорится о злой мачехе (антигерой) и о падчерице, то целью мачехи является устранение падчерицы из дома или убийство ее, а целью падчерицы — собственное спасение и иногда избавление отца от мачехи. В начальную информацию о знаниях, которые могут получить некие действующие лица в экспозиции, входит ряд специальных сведений, как, например, знания о волшебном сне из-за укола веретеном, сообщаемые пророчеством в сказке о спящей царевне.

В конце этого этапа устанавливается также наличие данных в экспозиции о параллельных ходах в сказке, которые имеют место, если в экспозиции введены дополнительные действующие лица (глупцы). В этом случае приоритет в дальнейшем развитии сказки отдается им, т. е. с них начинается реализация тела сказки.

**Этап 3.** На этом этапе строится сюжетная структура тела сказки. Построение сюжетной структуры (тематической линии основного для этой структуры действующего лица) разбивается на несколько уровней конкретизации. На первом уровне формируется последовательность типов встреч, приводящая к окончанию тематической линии. Для глупца это недостижение цели или гибель, для героя — достижение цели (встреча с наградой). Типы и количество встреч, а также их последовательность выбираются случайным образом с учетом значений исходных констант и условий связи между встречами.

На следующем уровне конкретизации по общему виду фреймов встреч формируются списки смысловых глаголов, которые содержатся в этих встречах. Так для фрейма встречи героя с дарителем (*H—Д*) таким типовым списком глаголов будет: идет — видит — просит сделать — делает — получает.

Списки глаголов для каждой встречи преобразуются в глагольные фреймы, позиции которых могут оставаться незаполненными.

Последовательность глагольных фреймов и образуют глагольную форму представления сюжетной структуры.

Глагольная структура (включая экспозицию и постпозицию) короткой законченной сказки может иметь, например, следующий вид:

Жил-был  $\langle\alpha\rangle$  имел  $\langle\beta\rangle$ . Налетел  $\langle\gamma\rangle$  унес  $\langle\beta\rangle$ . Послал  $\langle\alpha\rangle$   $H$  отыскать  $\langle\beta\rangle$  обещал  $\langle\epsilon\rangle$ . | Отправился  $H$  искать  $\langle\beta\rangle$ . Идет  $H$  видит  $\langle\rho\rangle$ . Попросил  $\langle\rho\rangle$   $H$  сделать  $\langle\delta\rangle$ . Сделал  $H$ . Обещал  $\langle\rho\rangle$  помочь  $H$ . Идет  $H$  видит  $\langle\mu\rangle$ . Вшел  $H$  ( $\nu$ ) смотрит  $H$  сидит  $\langle\beta\rangle$ . Спрятался  $H$ . Прилетел  $\langle\gamma\rangle$ . Схватил  $H$  ( $\eta$ ), позвал  $\langle\rho\rangle$ , убили  $\langle\zeta\rangle$ . Забрал  $H$   $\langle\beta\rangle$  вернулся (назад). | Получил  $H$   $\langle\epsilon\rangle$ . Сыграли (свадьбу) стали жить-поживать (добро) наживать.

Вертикальными линиями в этой структуре отделены экспозиция и постпозиция.

**Этап 4.** На этом этапе в полученной глагольной структуре из соответствующих списков воплощений действующих лиц выбираются конкретные значения для заполнения переменных, помещенных в скобки, после чего оказывается сформированным один из вариантов сказки, соответствующий описанной выше глагольной структуре. При заполнении к значениям переменных могут одновременно добавляться и их типовые характеристики. В результате реализации этого этапа приведенная глагольная структура может преобразоваться в следующую сказку:

«Жил-был царь, имел дочь. Налетел змей, унес (царскую) дочь. Послал царь Иванушку отыскать дочь, обещал (царскую) дочь в жены. | Отправился Иванушка искать (царскую) дочь. Идет Иванушка, видит странника. Попросил странник Иванушку сделать (ему) дубинку. Сделал дубинку Иванушка. Обещал странник помочь Иванушке. Идет Иванушка, видит пещеру, вошел Иванушка (в) пещеру, смотрит Иванушка сидит (царская) дочь. Спрятался Иванушка. Прилетел змей. Схватил Иванушка змея, позвал странника, убили змея. Забрал Иванушка (царскую) дочь и вернулся (назад). | Получил Иванушка (царскую) дочь в жены. Сыграли свадьбу, стали жить-поживать (добро) наживать.»

Легко видеть, что в рамках исходной глагольной структуры может быть создано множество вариаций рассмотренной сказки.

Так, вместо змея может быть, например, Кащей или дед-Черномор, вместо странника — серый волк, стариочек с ноготок и т. п. Таким образом, здесь мы также встречаемся с генерированием некоторой жесткой структуры, которая затем путем замены значений переменных (маскирующих элементов) может превратиться в различные, часто сильно отличающиеся варианты сказок.

Заметим, что в описанном алгоритме часть конкретных значений переменных устанавливается на первых этапах сочинения. Это при программной реализации осуществляется так называемым наследованием фреймов. Принцип этот заключается в том, что фреймы более низких уровней сохраняют (наследуют) конкретные значения переменных, установленные в соответствующих фреймах более высоких уровней.

---

## СЛОВАРЬ МУЗЫКАЛЬНЫХ ТЕРМИНОВ

**Аккорд** — одновременное сочетание нескольких (не менее трех) звуков различной высоты, которые расположены или могут быть расположены по терциям, т. е. с интервалом в две ступени, снизу вверх. При расположении аккорда по терциям его нижний звук называется основным тоном, или *примой*, последующие звуки: *терция*, *квинта*, *септима* и т. д. Аккорд — основной элемент гармонии. Примеры аккордов: *до, ми, соль; ре, соль, си; ре, фа, соль, си; соль, си, ре, фа, ля*.

**Алеаторика** — способ композиции или исполнения музыки, основанный на том, что различные элементы музыкального произведения подчинены более или менее управляемой случайности (в частности, в некоторых опытах используется чистая случайность при выборе звуков — путем бросания игральных костей, разбрызгиванием чернил по нотной бумаге и т. п.), что используется сознательно для осуществления творческого, художественного замысла. Применяется некоторыми композиторами нетрадиционного направления (Ц. Когоутек, 1976).

**Альтерация** — изменение (повышение или понижение) высоты основных ступеней звукоряда (*до, ре, ми, фа, соль, ля, си*) на полтона или тон. Знаки альтерации, используемые в настоящей работе:  $\sharp$  (диез) — повышение на полтона,  $\natural$  (дубль-диез) — повышение на тон,  $\flat$  (бемоль) — понижение на полтона,  $\flat\flat$  (бекар) — отказ от альтерации. При альтерации к названию основной ступени присоединяется название знака альтерации, например *фа-диез, си-бемоль, ми-бекар*. Знаки альтерации называются также хроматическими знаками.

**Вибратор** — периодическое изменение высоты звука в небольших пределах. Исполнительский прием в пении и в игре на струнных, особенно на смычковых инструментах, заключающийся в колебании связок голосового аппарата или в колебании пальца левой руки, прижимающего струну. Вибратор придает звукам особое тембровое качество, повышая их динамиичность и эмоциональную выразительность.

**Гамма** — поступенная последовательность звуков (звукоряд, шкала) в пределах одной октавы. Существуют гаммы с разным числом ступеней в октаве: пятиступенные — *пентатонные*, семиступенные — *диатонические*, двенадцатиступенные — *хроматические*. В хроматической гамме звуки расположены последовательно по полутоналам.

**Гармония** — объединение звуков в созвучия (одновременное сочетание двух и больше звуков) и последовательность созвучий, а также название учения о строении и последовании созвучий. При сопровождении мелодии аккордами гармония способствует болееному выражению ее содержания.

**Главные трезвучия** — трезвучия в основном виде (не являющиеся обращениями аккорда) — *тоника, субдоминанта и доминанта*.

**Гомофония** — вид многоголосия, в котором один голос (мелодия) главенствует, а все остальные голоса играют подчиненную роль (гармоническое сопровождение, аккомпанемент). Гомофонный склад музыки противопоставляется *полифоническому* (см. *контрапункт*).

**Диапазон** — звуковысотный объем музыкального инструмента, певческого голоса, мелодии и т. п. Определяется интервалом между самым низким и самым высоким звуками инструмента, голоса, мелодии и т. п.

**Додекафония** — способ сочинения музыки, основанный на полном равноправии всех двенадцати тонов хроматической гаммы и отрицании устойчивых и неустойчивых тонов. Додекафонная музыкальная система предполагает соблюдение некоторых основных правил построения композиции, разработанных ее создателями. Применяется некоторыми композиторами нетрадиционного направления в музыке. Элементы додекафонии используются и в творчестве советских композиторов (Л. Мазель, 1972, с. 590).

Первые опыты сочинения музыки по принципу додекафонии (около 1910 г.) принадлежат австрийскому композитору Й. Хаузеру (1883—1959 гг.). Сам же метод додекафонии как таковой был разработан австрийским композитором А. Шёнбергом (1874—1951 гг.) около 1920 г. (О додекафонии как методе см. И. Тильман, 1958, с. 120—126.)

**Доминанта** — название V ступени лада или трезвучия, построенного на этой ступени и называемого также доминантовым трезвучием. Например, в ладотональности *До мажор* доминантовое трезвучие имеет вид: *соль, си, ре*.

**Доминантсептаккорд** — название септаккорда, построенного на доминанте, V ступени лада. Например, в *До мажоре*: *соль, си, ре, фа*.

**Интонация** — мелодический оборот, состоящий из нескольких последовательных звуков; наименьшая часть мелодии, имеющая выразительное значение. Одно из средств создания музыкального образа.

**Кантата** — музыкальное произведение для певцов-солистов, хора и оркестра торжественного или лирико-эпического характера. Кантаты могут быть камерными (для солистов без хора), хоровыми (без солистов), с сопровождением или без сопровождения фортепиано или оркестра, одночастными или многочастными. По средствам выражения кантата сходна с *ораторией*, но обычно отличается от нее меньшим размером и большей однородностью.

**Контрапункт** — вид многоголосия в музыке; то же, что и *полифония*. Также название научной и учебной дисциплины, изучающей одновременное и согласованное движение нескольких самостоятельных и равноправных мелодических голосов, образующих гармоническое целое. Примерами музыкальных полифонических форм являются *фуга, инвенция, канон* и др.

**Мелос** — обобщенное понятие мелодического, песенного начала в музыке.

**Обращение аккорда** — видоизменение основного вида аккорда, образованное путем переноса некоторых его звуков на октаву вниз или вверх, при котором его нижним звуком становится не основной тон (прима), а один из других звуков аккорда. Например, трезвучие *ми, соль, до* — обращение основного трезвучия *до, ми, соль*; септаккорд *фа, соль, си, ре, фа* — обращение септаккорда в основном виде: *соль, си, ре, фа*.

**Основной аккорд**, или основной вид аккорда, — расположение аккорда, при котором нижним звуком является его основной тон (прима) независимо от того, как размещены его другие звуки. Основной аккорд может быть построен на разных ступенях лада.

**Септаккорд** — название аккорда, состоящего из четырех разноименных звуков, например *соль, си, ре, фа*. Название происходит от слова *септима* — наименование интервала, который образуется в этом аккорде между его крайними звуками (в нашем примере: *соль* — *фа*).

**Созвучие** — одновременное сочетание нескольких звуков разной высоты.

**Субдоминанта** — название IV ступени лада, или трезвучия, построенного на этой ступени и называемого также субдоминантовым трезвучием. Например, в *До мажоре* это трезвучие имеет вид: *фа, ля, до*.

**Тоника** — название основной, I ступени лада, а также аккорда трезвучия, построенного на этой ступени и называемого также тоническим трезвучием. Например, в *До мажоре* тоническое трезвучие имеет вид: *до, ми, соль*.

**Трезвучие** — аккорд из трех разноименных звуков, например *до, ми, соль; ре, соль, си; ля, до, фа* и др.

## ЛИТЕРАТУРА

- Алексеева Л. Об оценке песенной мелодии.— В кн.: Критика и музыкоznание. Вып. 2.— Л.: Музыка, 1980.
- Аствацатрян Л. Роль ЭВМ в создании серийного материала симфонии.— В кн.: Материалы Первого всесоюзного семинара по машинным аспектам алгоритмического формализованного анализа музыкальных текстов.— Ереван: АН Арм. ССР, 1977.
- Афанасьев А. М. Народные русские сказки.— М.: ГИХЛ, 1957, тт. 1, 2, 3.
- Бобров С. Волшебный двурог.— М.: Детгиз, 1946.
- Борель Э. Случай.— М.— П.: ГИЗ, 1923.
- Бирюков Б. В., Гутчин И. Б. Машина и творчество.— М.: Радио и связь, 1982.
- Бремон К. Логика повествовательных возможностей.— В кн.: Семиотика и искусствометрия.— М.: Мир, 1972.
- Будяковский А. Симфоническая музыка П. И. Чайковского.— Л.: 1935.
- Виленкин Н. Я. Популярная комбинаторика.— М.: Наука, 1975.
- Володин А. А. Электронные музыкальные инструменты.— М.: Энергия, 1970.
- Воробьев Г. Г. Документ: информационный анализ.— М.: Научный совет по кибернетике АН СССР, 1973.
- Гаазе-Рапопорт М. Г. Искусственный интеллект и психология.— Вопросы психологии, 1976, № 1.
- Гаазе-Рапопорт М. Г., Поступов Д. А., Семенова Е. Т. Порождение структур волшебных сказок.— М.: Научный совет по кибернетике АН СССР, 1980.
- Галактионова А. К. Плетение кружев.— М.: КОИЗ, 1948.
- Галацкая В. С. Музыкальная литература зарубежных стран. Вып. II.— М.: Музгиз, 1957.
- Гальярдо (Gagliardo E.). Introduzione all'edizione italiana.— In: R. Ch. Zaripov. Musica con il calcolatore.— Padova: Muzzio, 1979.
- Гальярдо, Форназари (Gagliardo E., Fornasari P.). Composizione di musica classica mediante elaboratore elettronico.— Quaderni di informatica, 1978, v. 5, № 2.
- Гарбузов Н. А. Зонная природа звуковысотного слуха.— М.— Л.: 1948.
- Гарднер М. Математические головоломки и развлечения.— М.: Мир, 1971.
- Гарднер М. Математические досуги.— М.: Мир, 1972.
- Гарднер М. Математические новеллы.— М.: Мир, 1974.
- Гинзбург Л. История виолончельного искусства. Русская виолончельная школа (1860—1917).— М.: Музыка, 1965.
- Гнеденко Б. В. Курс теории вероятностей.— М.: Гостехиздат, 1954.
- Грекова И. К вопросу об информации.— Наука и жизнь, 1967, № 3.
- Давыдова С. А. Русское кружево и русские кружевницы. Исследование историческое, техническое и статистическое Софии Давыдовой.— СПб.: Тип. А. С. Суворина 1892.
- Добрушин Р. Л. Математические методы в лингвистике.— В кн.: Математическое просвещение (новая серия).— М.: Физматгиз, 1961, вып. 6.

- Долгов О. Т.** Игра в 15.— Квант, 1974, № 2.
- Завалишина Д. Н.** О значении перспективного, логического и манипулятивного компонентов при решении дискретных задач.— В кн.: Материалы III Всесоюзного съезда общества психологов СССР. Т. 1.— М.: 1968.
- Загоруйко Н. Г.** Искусственный интеллект и эмпирическое предсказание.— Новосибирск: 1975.
- Зак В. И.** О мелодике массовой песни.— М.: Советский композитор, 1979.
- Зарипов Р. Х.** Кибернетика и музыка.— М.: Знание, 1963.
- Зарипов Р. Х. (Zaripov R. Ch.).** Solution of Harmony Problems and Analysis of Harmonization by Digital Computer.— Systems Theory Research, 1968, v. 18.
- Зарипов Р. Х. (Zaripov R.).** Musik und Rechenautomat.— In: Ideen des exakten Wissens.— Stuttgart: DVA, 1969, No. 2/69.
- Зарипов Р. Х. (Zaripov R.).** Cybernetics and Music.— In: Perspectives of New Music.— Princeton: 1969, v. 7, No. 2.
- Зарипов Р. Х.** Кибернетика и музыка.— М.: Наука, 1971а.
- Зарипов Р. Х.** Роль установки при восприятии музыки, сочиненной на ЭВМ.— В кн.: Материалы IV Всесоюзного съезда Общества психологов.— Тбилиси: Мецниереба, 1971б.
- Зарипов Р. Х.** Моделирование функций композитора и музыканта на ЭВМ и транспозиция отношений элементов.— Československá psychologie: 1971, v. 15, No. 5.
- Зарипов Р. Х.** Математические модели в музыкальном творчестве.— В кн.: Трети конгрес на Българските математики. Част 1.— Варна: 1972.
- Зарипов Р. Х.** Об алгоритмизации музыкальных вариаций.— ДАН СССР, 1973, т. 211, № 3.
- Зарипов Р.** Моделирование транспозиции инвариантных отношений и музыкальных вариаций на вычислительной машине.— Kybernetika, 1973, v. 9, No. 5.
- Зарипов Р.** Моделирование функций композитора и музыканта на ЭВМ.— В кн.: Труды IV Международной объединенной конференции по искусственному интеллекту. Вып. 10.— М.: Научный совет по кибернетике АН СССР, 1975.
- Зарипов Р. Х.** О моделировании художественного творчества.— В кн.: Управление, информация, интеллект/Под ред. А. И. Берга и др.— М.: Мысль, 1976.
- Зарипов Р. Х. (Zaripow R.).** Komputerowe modelowanie muzyki.— Problemy, 1976, No. 7.
- Зарипов Р. Х. (Zaripov R. Ch.).** Musica con il calcolatore.— Padova: Muzzio, 1979.
- Зарипов Р. Х.** Моделирование в музыке.— В кн.: Кибернетика. Современное состояние.— М.: Наука, 1980.
- Зарипов Р. Х.** Машинная музыка и ее восприятие.— М.: Научный совет по кибернетике АН СССР, 1980.
- Зарипов Р. Х.** Музыка и искусственный интеллект.— В кн.: Число и мысль. Вып. 3.— М.: Знание, 1980.
- Зарипов Р. Х. (Zaripov R. Kh.).** Frequency lists of musical intonations.— In: Symposium on common aspects of processing of linguistic and musical data.— Tallinn: 1982.
- Зарипов Р. Х.** Анализ и алгоритмизация мелодий с помощью частотных словарей музыкальных интонаций.— ДАН СССР, 1983, т. 268, № 2.
- Зелиньски (Zielinski G.).** Sztuka komputerowa.— Informatyka, 1973, No. 5.
- Исакова К. В.** Плетение кружев.— М.: ВКИ, 1958.
- Касслер М.** МИР — простой язык программирования для поиска музыкальной информации.— В кн.: А. Моль, В. Фукс, М. Касслер. Искусство и ЭВМ.— М.: Мир, 1975.

- Кемени Дж., Снелл Дж.* Кибернетическое моделирование. Некоторые приложения.— М.: Сов. радио, 1972.
- Клыков Ю. И., Рыбакова Т. К.* Модель решения игры «5».— В кн.: Доклады НТК по итогам НИР за 1966—1967 гг. Подсекция применения средств вычислительной техники.— М.: МЭИ, 1967.
- Когоутек Ц.* Техника композиции в музыке XX века.— М.: Музыка, 1976.
- Колмогоров А. Н.* Пример изучения метра и его ритмических вариантов.— В кн.: Теория стиха.— Л.: Наука, 1968.
- Кондратов А. М.* Создание словарей поэтического языка и рифм посредством ЭВМ.— В кн.: Тезисы и аннотации Симпозиума по комплексному изучению художественного творчества. М.— Л.: 1963.
- Копржива (Kopriva J.).* Samocinný počítac jako pomocník skladatele experimentální hudby.— In: Deset let práce laboratoře počítacích strojů VUT.— Brno: 1972.
- Корчинский Е.* К вопросу о теории канонической имитации.— Л.: Музгиз, 1960.
- Кулаковский Л.* Песня, ее язык, структура, судьбы. На материале русской и украинской народной, советской массовой песни.— М.: Советский композитор, 1962.
- Куме (Coutmet E.).* Mersenne: dénombrements, répertoires, numérations de permutations.— Math. et sci. hum., 1972, v. 10, No. 38.
- Левин М. Ю.* Применение ЭВМ для составления словарей, рифм.— В кн.: НТР и развитие художественного творчества.— Л.: Наука, 1980.
- Линкольн (Lincoln H. B., ed.).* The Computer and Music.— Ithaca, London: Cornell Univ. Press, 1970.
- Люкас Э.* Математические развлечения.— Петроград: 1924.
- Мазель Л. А.* Проблемы классической гармонии.— М.: Музыка, 1972.
- Мазель Л. А., Цуккерман В. А.* Анализ музыкальных произведений.— М.: Музыка, 1967.
- Марков А. А.* Пример статистического исследования над текстом «Евгения Онегина», иллюстрирующий связь испытаний в цепь.— Изв. Импер. Академии наук, VI серия.— СПб.: 1913, № 2.
- Мелетинский Е. М.* Герой волшебной сказки.— М.: ИВЛ, 1958.
- Минский (Minsky M., ed.).* Semantic Information Processing.— Cambridge: MIT Press, 1968.
- Моль А.* Искусство и ЭВМ.— В кн.: А. Моль, В. Фукс, М. Касслер. Искусство и ЭВМ.— М.: Мир, 1975.
- Налимов В. В.* Вероятностная модель языка.— М.: Наука, 1974.
- Нестьев И.* Путь Й. Дунаевского.— Советская музыка, 1955, № 11.
- Переверзев-Орлов В. С.* Модели и методы автоматического чтения.— М.: Наука, 1976.
- Пиотровски (Piotrowski J. A., Piotrowski Z.).* Eksperiment analiticzno-syntetyczny w badaniach entomuzykologicznych.— In: Ze studiow nad metodami etnomuzykologii.— Warszawa: 1975.
- Полетаев И. А.* «Трудный период» кибернетики и американские роботы.— Вступительная статья в кн.: Человеческие способности машин.— М.: Сов. радио, 1971.
- Поспелов Д. А., Пушкин В. Н.* Мышление и автоматы.— М.: Сов. радио, 1972.
- Прохоров А.* Эталонный ямб.— Наука и жизнь, 1964, № 3.
- Пропп В. Я.* Морфология сказки.— М.: Академия, 1928.
- Пропп В. Я.* Морфология сказки.— 2-е изд.— М.: Наука, 1969.
- Пушкин В. Н.* Оперативное мышление в больших системах.— М.— Л.: Энергия, 1965.
- Пушкин В. Н.* Психология и кибернетика.— М.: Педагогика, 1971.
- Пушкин В. Н., Фетисов В.* Интуиция и ее экспериментальное изучение.— Наука и жизнь, 1969, № 1.

- Райз Е. С.* (составитель). О музыке и музыкантах. Афоризмы, мысли, изречения, высказывания.—Л.: Музыка, 1969.
- Работнова И. П.* Русское народное кружево.—М.: 1956.
- Рехачев М.* Вологодские кружева.—Вологда: 1955.
- Римский-Корсаков Н. А.* Письмо к сыну Андрею от 6 ноября 1902 г.—Советская музыка, 1958, № 6.
- Рошияну Н.* Традиционные формулы сказки.—М.: Наука, 1974.
- Рубинштейн С. Л.* Основы психологии.—М.: 1935.
- Ружичка (Růžička R.). Samočinné počítací a současné směry v hudbě.*—In: Deset let práce laboratoře počítacích strojů VUT.—Brno: 1972.
- Ружичка (Růžička R.). Vyuzití samočinných počítaců při vzniku uměleckých děl se zvláštním zaměřením na hudbu a soudobou hudební kompozici.*—Brno: 1980.
- Скребков С. С.* Учебник полифонии.—М.—Л.: Музгиз, 1951.
- Соболев С. Л.* Да, это вполне серьезно!—В кн.: Возможное и невозможное в кибернетике.—М.: Наука, 1963.
- Способин И. В.* Музыкальная форма.—М.: Музгиз, 1947.
- Способин И. В.* Элементарная теория музыки.—М.: Музгиз, 1951.
- С. С. (S. S.).* Родина «Чижика».—Русская музыкальная газета.—Петроград: 1916, № 28/29.
- Тильман И.* О дodeкафонном методе композиции.—Советская музыка, 1958, № 11.
- Тьюринг А. М.* Может ли машина мыслить?—М.: Физматгиз, 1960.
- Управление, информация, интеллект/Под ред. А. И. Берга и др.—М.: Мысль, 1976.
- Успенский Я. В.* Избранные математические развлечения.—Петроград: 1924.
- Фетисов В. М.* Формирование понимания в процессе решения комбинаторных задач.—В кн.: Материалы Общества психологов СССР к XIX Международному психологическому конгрессу.—М.: 1969.
- Фукс В.* По всем правилам искусства. Точные методы в исследованиях литературы, музыки и изобразительного искусства.—В кн.: А. Моль, В. Фукс, М. Касслер. Искусство и ЭВМ.—М.: Мир, 1975.
- Хиллер (Hiller L.). Music Composed with Computers. A Historical Survey.*—In: H. B. Lincoln (ed.). The Computer and Music.—Ithaca, London, Cornell Univ. Press, 1970.
- Хованский А. Н.* Приложение ценных дробей и их обобщений к вопросам приближенного анализа.—М.: Гостехиздат, 1956.
- Швейцер А.* Иоганн Себастьян Бах.—М.: 1964.
- Шеннон (Shannon C. E.).*—In: Proc. First London Symposium on Information Theory.—London: 1953.
- Шрейдер Ю. А.* О семантических аспектах теории информации.—В кн.: Информация и кибернетика.—М.: Сов. радио, 1967.
- Шрейдер Ю. А.* Присущ ли машинам разум?—Вопросы философии, 1975, № 2.
- Штейн (Stein R. H.). Tschaikowsky.*—Stuttgart: DVA, 1927.
- Штейнпресс Б. С., Ямпольский И. М.* (авторы-составители). Энциклопедический музыкальный словарь.—2-е изд.—М.: Советская энциклопедия, 1966.
- Шуберт Г.* Математические развлечения и игры.—Одесса: 1923.

## ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Аверкин А. 40, 41  
Александров А. 99—101  
Алексеева Л. 210  
Анненский И. 24, 25  
Архангельский А. 26  
Аствацатрян Л. 45  
Афанасьев А. 215, 217
- Барбо П. 45  
Бах И. 92, 96  
Берг А. 11  
Бетховен Л. 94, 95, 105  
Борцов С. 179  
Бонгард М. 8  
Борель Э. 46  
Бремон К. 214  
Будяковский А. 98
- Варламов А. 86, 87  
Виленкин Н. 179  
Воробьев Г. 29, 123
- Гаазе-Рапопорт М. 8, 213, 221  
Галактионова А. 55, 58  
Галацкая В. 96  
Гальярдо Э. 46  
Гарднер М. 179  
Тейне Г. 24  
Глинико М. 42, 97, 98  
Гнеденко Б. 67  
Грекова И. 29  
Гурилев А. 154  
Гуэрчия А. 101
- Давыдова С. 54  
Добрушин Р. 67  
Долгов О. 179  
Дулупов А. 73, 77, 79.  
Дунаевский И. 88, 89, 92, 98, 100, 105,  
141, 145, 153, 160, 166, 170
- Завалишина Д. 179  
Загоруйко Н. 10, 11  
Зак В. 127  
Зарипов Р. 7, 8, 12—14, 37, 40, 44, 46, 69,  
82, 104, 126, 166, 168, 209, 210  
Зелиньская Г. 37
- Исакова К. 55, 58
- Касслер М. 66  
Келер В. 19  
Кемени Дж. 67  
Клейн 214  
Клыков Ю. 179  
Книппер Л. 90  
Когоутек Ц. 224
- Козлова С. 27  
Козловский И. 42  
Колмановский Э. 101  
Колмогоров А. 102  
Кондратов А. 45  
Копржива Я. 37  
Корчинский Е. 215  
Криницкий Н. 8  
Ксенакис Я. 45  
Кулаковский Л. 100, 210  
Куме Е. 45
- Лебедев-Кумач В. 166  
Лепин А. 85, 106  
Линкольн Г. 13  
Липкин И. 27  
Люкас Э. 179  
Ляпунов А. 8
- Мазель Л. 225  
Марков А. 67—79  
Маршак С. 28  
Маяковский В. 27  
Мелетинский Е. 214  
Мерсенин М. 45  
Минский М. 213  
Мравинский Е. 42
- Налимов В. 54  
Нестьев И. 98
- Обухов А. 205  
Огарев Н. 24, 25  
Орлов В. 38
- Пахмутова А. 99—101  
Переверзев-Орлов В. 48  
Петербургский Г. 93  
Пиотровски 37  
Полетаев И. 8, 47, 50  
Поспелов Д. 179, 213, 221  
Прокофьев С. 98  
Пропп В. 213  
Прохоров А. 102  
Пушкин А. 27, 67  
Пушкин В. 6, 7, 179, 187, 189, 201
- Лаботникова И. 54  
Райзе Е. 97  
Рехачев М. 54  
Римский-Корсаков Н. 83, 96, 98  
Рошиану Н. 214  
Рубинштейн А. 85  
Рубинштейн С. 17, 19  
Ружичка Р. 13, 45  
Рыбакова Т. 179

Семенова Е. 213, 221  
 Скребков С. 45, 49  
 Снелл Дж. 67  
 Соболев С. 45  
 Соловьев-Седой В. 93  
 Способин И. 205

Тильман И. 225  
 Торндайк Э. 5  
 Тюменев И. 24—26  
 Тьюринг А. 11, 40, 41

Фалья М. де 17  
 Фетисов В. 198, 201  
 Фитценгаген В. 97  
 Форназари А. 46  
 Фукс В. 26, 111

Хаслер Х. 96  
 Хауэр И. 225  
 Хиллер Л. 44  
 Хованский А. 48  
 Холопова В. 49

Цетлин М. 8

Чайковский П. 42, 82, 92—106

Шафран Д. 42  
 Швейцер А. 96  
 Шенон К. 67  
 Шкловский В. 26  
 Шопен Ф. 93  
 Шостакович Д. 15—17, 42, 79, 98  
 Шрейдер Ю. 29  
 Штейн Р. 97  
 Штейнпресс Б. 81  
 Штраус И. 50, 117  
 Шуберт Г. 179  
 Шуберт Ф. 24

Эренфельс Г. 17

Ямпольский И. 81

## ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

Алгоритм 12  
 — вероятностный 12, 110—112  
 — детерминированный 112  
 — имитирующий 14  
 — параметры 113  
 — несущественные 118—120  
 —, — переменные 113—120  
 —, — постоянные 113—120  
 —, — случайные 115—120  
 —, — существенные 118—120  
 —, строение 116—120

Вариация 15 и д.  
 — константа 22, 23, 106—109, 150  
 — орнаментальная 21, 23, 107, 159  
 —, сочинение на ЭВМ 128—177  
 — темы 106  
 Варьирование 9, 14, 15, 90 и д.  
 Вероятности переходные 67, 69—72

Затакт 89, 129, 131, 168  
 —, направление движения 155  
 —, формирование 154

Иерархичность структуры 51, 54 и д.  
 Иерархия 51  
 — понятий 51, 57, 115—123  
 — уровня определения понятий 51, 115—123  
 Инвариант 10, 15, 18, 106—109, 140, 157 и д.  
 —, перенос 146, 202  
 —, — вертикальный 146  
 Интервалы звуковысотные 16, 131  
 —, — вычитание 136—141  
 —, — сложение 136—141  
 —, — основные 139  
 Интуиция подражания 13, 49, 50, 80, 81, 209  
 — узнавания 13, 50, 80, 209

Кодирование понятное 129—131  
 — патактовое 129—131  
 Коклюшки 54—64

Композиция музыкальная 110 и д.  
 —, — параметры 113—127  
 —, — несущественные 118—120  
 —, — переменные 113—120  
 —, — постоянные 113—120  
 —, — случайные 115—120  
 —, — существенные 118—120  
 —, — принципы синтезирования 14  
 —, — типы 121  
 —, — элементы 110  
 Константы 18, 22, 23, 106 и д.

Линия звуковысотная 86

Маскировка 24, 28, 99, 201  
 Матрица перехода 67—79, 112  
 Мелодия 13, 15 и д.  
 —, анализ 67  
 —, вариационное развитие 92—103  
 —, гармонизация 65  
 —, принципы варьирования 103—109  
 —, синтез 67  
 —, структура звуковысотная 88—104  
 —, ладогармоническая 104  
 —, масштабная 87, 104  
 —, ритмическая 88, 104  
 —, элементы 128  
 Метод анализа — синтеза 120—125  
 Метр (тактовый размер) 85, 129  
 —, преобразование 142—146  
 Моделирование 13 и д.  
 —, анализ объектов 35  
 —, имитационное 13, 14, 32, 33, 110—127  
 —, математическое 33, 48  
 —, метод марковских цепей 66  
 —, — процедурный 66  
 —, оценка результатов 35—37  
 —, сильное 65  
 —, слабое 65  
 —, творчества 47 и д.  
 —, этапы 35—37  
 Модель математическая 33 и д.  
 —, нотного текста 67  
 —, формирование 35

- Нота** 16  
 —, высота 132  
 —, длительность 128, 132  
 —, — начало 130  
 —, —, элементарные сочетания 128, 129  
 — межвысотная 154  
 — опорная (ОП) 156  
 —, признак II 155  
 —, — III 155, 156  
 — сильная 16, 146  
 — слабая 16, 146  
 — стержневая (СТ) 146—149, 164
- Плетение кружев** 54—64  
 —, —, алгоритм 58—64
- Понятие** 51  
 —, определение 51, 57, 115—123  
 —, — уровня 51, 115—123
- Порог узнавания** 29
- Ритм** 16, 85, 431  
 —, график 132  
 — песенный 126, 167—170
- Ритм, преобразование** 157  
 — стихотворный 126, 166—168  
 —, формирование 157
- Секвенция** 89, 105  
 — знаковая 94, 96, 105, 155—157
- Сетка метрическая** 131—135  
 —, —, преобразование 142—146  
 —, —, узел 131—135
- Система семиричная** 136
- Структура** 17  
 — инвариантная 17  
 — —, перенос 92 и д.
- Тезаурус** 24, 29, 123  
**Тест Тьюринга** 11, 41
- Числа случайные** 110—121, 126, 211
- Цепи Маркова** 66—79



Р. Х. ЗАРИПОВ

МАШИННЫЙ ПОИСК  
ВАРИАНТОВ  
ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ  
ТВОРЧЕСКОГО  
ПРОЦЕССА