

V

---

**ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ  
АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА  
И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ**

---

Л.А.Золоторевич, Е.Л.Рубин

ИНТЕРВАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ  
УСТРОЙСТВ СО СХОДЯЩИМИСЯ ВЕТВЛЕНИЯМИ

В настоящее время известны методы, позволяющие для достаточно широкого класса цифровых устройств решать задачу анализа достоверности их переключения. Эти методы базируются на многозначном представлении реального сигнала и не учитывают в явном виде задержки компонентов схемы [1, 2]. Но существующие методы моделирования цифровых устройств с учетом задержек позволяют решать некоторые задачи исследования происходящих в схеме процессов во временной области, однако не решают первую задачу для устройств общего вида [3, 4]. В то же время при проектировании цифровых устройств типа БИС часто возникает необходимость обеспечения функциональной устойчивости устройства при его максимально возможном быстродействии. В такой постановке задача может решаться только на адекватной временной модели.

В данной статье предлагается метод интервального временного моделирования цифровых устройств со сходящимися ветвлениями, базирующийся на методе Чаппеля [3] и повышающий точность его результатов путем учета особенностей функционирования цифровых устройств со сходящимися ветвлениями.

Как известно, ошибка при моделировании сходящегося ветвления возникает, если на этапе моделирования элемента стока не учитывается общность происхождения входных сигналов [5]. Так, если промоделировать фрагмент схемы (рис. 1) методом Чаппеля, предположив, что на его вход поступает сигнал, переключающийся из единицы в нуль в интервале времени (0, 5), а задержки расположены в интервале (2, 4), то на выходе в интервале времени (4, 9) появляется ошибочный им-

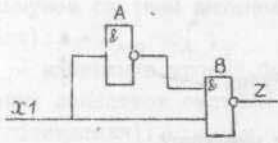


Рис. 1. Пример сходящегося ветвления

Известно, что отрицательный результат может быть получен при моделировании методом Чапеля опасного сходящегося ветвления, т.е. имеющего хотя бы в двух ветвях разное по четности число инверсий ветвящегося сигнала. Однако ошибка может возникать в тех опасных ветвлениях, в которых для элемента стока реализующего функцию И или И-НЕ, ветвящийся сигнал изменяется из единицы в нуль; для элемента стока, реализующего функцию ИЛИ либо ИЛИ-НЕ, ветвящийся сигнал изменяется из нуля в единицу.

Для того чтобы иметь возможность проанализировать выполнение этих условий, необходимо до моделирования путем структурного анализа моделируемой схемы выделить все сходящиеся ветвления, сгруппировав их в соответствующие пучки и классы [1], отметить элементы стока и источники ветвящихся сигналов. Заметим, что в данной статье, как и в [1], мы ограничиваемся рассмотрением сходящихся ветвлений, имеющих непосредственную связь ветвящегося сигнала с входом элемента стока. В действительности интересным для практических целей было бы рассмотрение сходящихся ветвлений общего вида, как в работе [5]. Однако при этом возникает большая сложность в решении задачи, что ограничивает практическое использование такого решения.

При попытке применить результаты работы [3] для моделирования сходящихся ветвлений оказалось, что троичное представление сигнала в "настоящем свободном выходном" векторе, описывающем функционирование элемента, неудобно (хотя и возможно) из-за необходимости выполнения специальных процедур по анализу формы ветвящегося сигнала, что требуется при выборе стратегии моделирования элементов сходящегося ветвления.

пульсный сигнал отрицательной полярности. (Из-за громоздкости метода процесс вычисления сигнала не приводится.) Схематический анализ функционирования структуры такой результат отрицает, так как в действительности на

Для уточнения результатов моделирования опасного сходящегося ветвления в данной статье используется идея маркирования ветвящегося сигнала [1] и применяется шестизначная модель сигнала при его вычислении по методу Чапеля. Если при моделировании элемента источника ветвящегося сигнала значение сигнала оказалось  $\alpha$  или  $\omega$ , то данному сигналу присваивается пара меток - четная и нечетная (каждый ветвящийся сигнал будет иметь свою пару меток). На этапе вычисления мгновенного выходного значения сигнала при моделировании элементов схемы, на входы которых воздействуют сигналы с метками, вычисляются дополнительно значения меток сигнала по формуле

$$M = (M1 \wedge K1) \vee (M2 \wedge K2) \vee (M1 \wedge M2),$$

где  $M1$  - метки сигнала, воздействующие на первый вход логического элемента;  $M2$  - метки сигнала, воздействующие на второй вход логического элемента;  $K1$  и  $K2$  - множители, выбираемые соответственно из табл. 1 и 2 исходя из значений сигналов, воздействующих на первый и второй входы логического элемента.

Таблица 1

	0	1	$\alpha$	$\omega$	$\lambda$	$\gamma$
0	0	0	2	0	2	0
1	0	0	0	3	0	3
$\alpha$	0	0	0	0	0	0
$\omega$	0	0	0	0	0	0
$\lambda$	0	0	0	0	0	0
$\gamma$	0	0	0	0	0	0

Таблица 2

	0	1	$\alpha$	$\omega$	$\lambda$	$\gamma$
0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0
$\alpha$	2	0	0	0	0	0
$\omega$	0	3	0	0	0	0
$\lambda$	2	0	0	0	0	0
$\gamma$	0	3	0	0	0	0

Вычисление мгновенного выходного значения сигнала производится по шестизначным таблицам истинности, приведенным в [1]. Если моделируемый элемент является элементом стока, то следует обнаружить ошибку и выполнить процедуру корректировки результата. Это осуществляется путем анализа мгновенного выходного значения сигнала  $G_L$ . Если  $G_L = \gamma$  (для элемента типа И-НЕ) или  $G_L = \lambda$  (для элемента типа И) и метка сигнала нечетная, то мгновенное выходное значение сигнала корректируется на единицу (для элемента типа И-НЕ) и на нуль (для элемента типа И). Если  $G_L = \lambda$  (для элемента типа ИЛИ-НЕ) и метка сигнала четная, то мгновенное выходное

значение сигнала корректируется на нуль. Если  $G_i = \gamma$  (для элемента типа ИЛИ) и метка четная, то мгновенное выходное значение сигнала корректируется на единицу. В остальных случаях корректировка сигнала не производится.

Результаты моделирования работы схем, приведенных на рис. 2, а - г показаны соответственно в табл. 3 - 6.

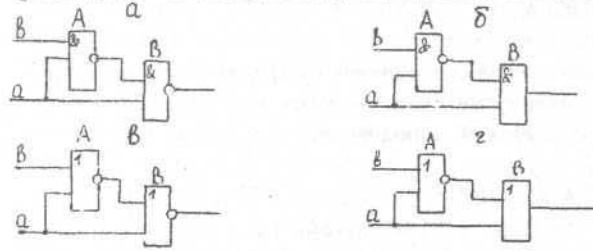


Рис. 2. Примеры сходящихся ветвлений

Таблица 3

a	b	A	B	$G_i$
1	0	1	0	0
$\omega_{1,2}$	0	1	$\lambda_{1,2}$	$\lambda$
0	0	1	1	1
1	1	0	1	1
$\omega_{1,2}$	1	$\alpha_{1,2}$	$\gamma_{1,2}$	1
0	1	1	1	1
1	0	1	0	0
$\omega_{1,2}$	$\alpha_0$	$\gamma_0$	$\lambda_0$	$\lambda$
0	1	1	1	1
1	1	0	1	1
$\omega_{1,2}$	$\lambda_0$	$\gamma_0$	$\alpha_0$	$\lambda$
0	0	1	1	1
1	0	1	0	0
$\omega_{1,2}$	$\lambda_0$	$\gamma_0$	$\alpha_0$	$\lambda$
0	0	1	0	0
1	1	0	0	0
$\omega_{1,2}$	$\gamma_0$	$\alpha_0$	$\lambda_0$	$\lambda$
0	1	1	0	0

Таблица 4

a	b	A	B	$G_i$
1	0	1	1	1
$\omega_{1,2}$	0	1	$\omega_{1,2}$	$\omega$
0	0	1	0	0
1	1	0	0	0
$\omega_{1,2}$	1	$\alpha_{1,2}$	$\lambda_{1,2}$	0
0	1	1	0	0
1	0	1	1	1
$\omega_{1,2}$	$\alpha_0$	$\gamma_0$	$\omega_0$	$\omega$
0	1	1	0	0
1	1	0	0	0
$\omega_{1,2}$	$\omega_0$	$\lambda_0$	$\lambda_0$	$\lambda$
0	0	1	0	0
1	0	1	1	1
$\omega_{1,2}$	$\lambda_0$	$\gamma_0$	$\omega_0$	$\omega$
0	0	1	0	0
1	1	0	0	0
$\omega_{1,2}$	$\gamma_0$	$\alpha_0$	$\lambda_0$	$\lambda$
0	1	1	0	0

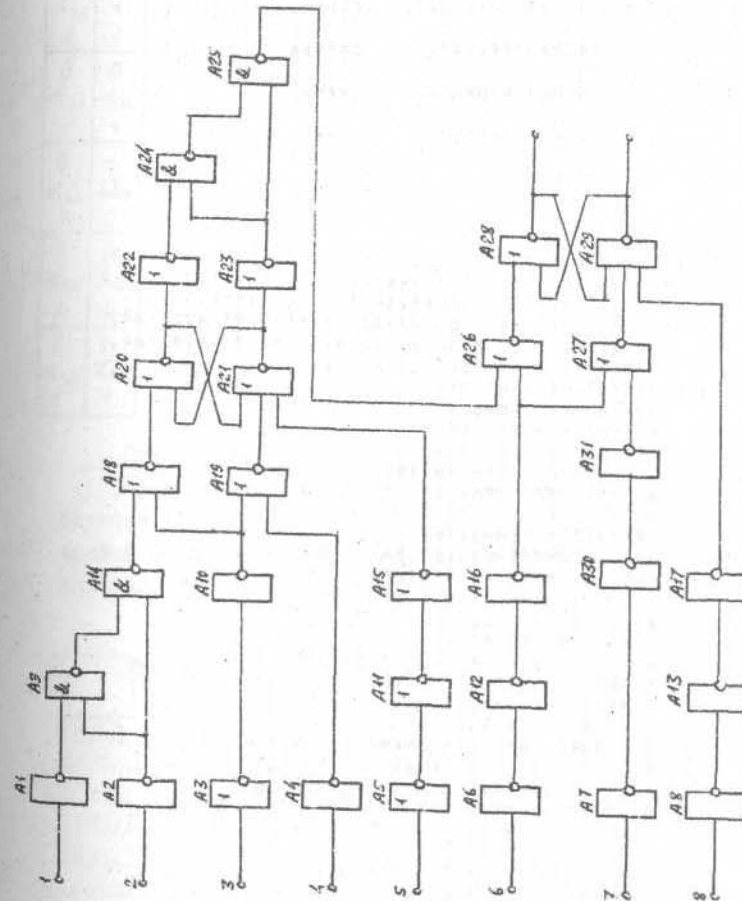


Рис. 3. Логическая структура "СХЕМА 6".  
 Задержки элементов: минимальная величина для элемента НЕ 7 нс, И-НЕ 2 нс, ИЛИ-НЕ 3 нс; максимальная величина для элемента НЕ 12 нс, И-НЕ 4 нс, ИЛИ-НЕ 6 нс

РАБОТАЕТ ПАКЕТ ПРИКЛАДНЫХ ПРОГРАММ ПО МОДЕЛИРОВАНИЮ ДИСКРЕТНЫХ УСТРОЙСТВ (ППП ДУ)

ВЫПОЛНЯЕТСЯ ЗАДАНИЕ СХЕМА 6

1. ТРАНСЛИРОВАТЬ СХЕМА 6
2. РАНЖИРОВАТЬ СХЕМА 6
3. ПОДГОТОВИТЬ СХЕМА 6
4. МОДЕЛИРОВАТЬ СХЕМА 6

КОНЕЦ

1. БЛОК СХЕМА 6

2. ПР01 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9-A2(10), 10-A3(10), 11-A4(10),
3. \*12-A5(10), 13-A6(10), 14-A7(10), 15-A8(10),
4. \*16-A9(10), 17-A10(10), 18-A14(10), 19-A18(10),
5. \*20-A19(10), 21-A20(10), 22-A21(10), 23-A22(10),
6. \*24-A23(10), 25-A24(10), 26-A25(10), 27-A26(10),
7. \*28-A27(10), 29-A28(10), 30-A29(10)
8. ТЭЗЫ A1(10)/ИЛИНЕ/1-ПР01(1)
9. A2(10)/ИЛИНЕ/1-ПР01(2)
10. A3(10)/ИЛИНЕ/1-ПР01(3)
11. A4(10)/ИЛИНЕ/1-ПР01(4)
12. A5(10)/ИЛИНЕ/1-ПР01(5)
13. A6(10)/ИЛИНЕ/1-ПР01(6)
14. A7(10)/ИЛИНЕ/1-ПР01(7)
15. A8(10)/ИЛИНЕ/1-ПР01(8)
16. A9(10)/ИЛИНЕ/1-A1(10), 2-A2(10)
17. A10(10)/ИЛИНЕ/1-A3(10)
18. A11(10)/ИЛИНЕ/1-A5(10)
19. A12(10)/ИЛИНЕ/1-A6(10)
20. A13(10)/ИЛИНЕ/1-A8(10)
21. A14(10)/ИЛИНЕ/1-A2(10), 2-A9(10)
22. A15(10)/ИЛИНЕ/1-A11(10)
23. A16(10)/ИЛИНЕ/1-A12(10)
24. A17(10)/ИЛИНЕ/1-A13(10)
25. A18(10)/ИЛИНЕ/1-A10(10), 2-A14(10)
26. A19(10)/ИЛИНЕ/1-A10(10), 2-A4(10)
27. A20(10)/ИЛИНЕ/1-A18(10), 2-A21(10)
28. A21(10)/ИЛИНЕ/1-A15(10), 2-A19(10), 3-A20(10)
29. A22(10)/ИЛИНЕ/1-A20(10)
30. A23(10)/ИЛИНЕ/1-A21(10)
31. A24(10)/ИЛИНЕ/1-A22(10), 2-A23(10)
32. A25(10)/ИЛИНЕ/1-A23(10), 2-A24(10)
33. A26(10)/ИЛИНЕ/1-A16(10), 2-A25(10)
34. A27(10)/ИЛИНЕ/1-A16(10), 2-A31(10)
35. A28(10)/ИЛИНЕ/1-A26(10), 2-A29(10)
36. A29(10)/ИЛИНЕ/1-A17(10), 2-A27(10), 3-A28(10)
37. A30(10)/ИЛИНЕ/1-A7(10)
38. A31(10)/ИЛИНЕ/1-A30(10)

Таблица 5

Q	b	A	B	Gi
0	0	1	0	0
$\alpha_{1,2}$	0	$\omega_2$	$\lambda_2$	0
1	0	0	0	0
0	1	0	1	1
$\alpha_{1,2}$	1	0	$\omega_0$	$\omega$
1	1	0	0	0
0	0	1	0	0
$\alpha_{1,2}$	$\alpha_0$	$\omega_0$	$\lambda_0$	$\lambda$
1	1	0	0	0
0	1	0	1	1
$\alpha_{1,2}$	$\omega_0$	$\lambda_0$	$\omega_0$	$\omega$
1	0	0	0	0
0	0	1	0	0
$\alpha_{1,2}$	$\lambda_0$	$\omega_0$	$\lambda_0$	$\lambda$
1	0	0	0	0
0	1	0	1	1
$\alpha_{1,2}$	$\gamma_0$	$\lambda_0$	$\omega_0$	$\omega$
1	1	0	0	0

Таблица 6

Q	b	A	B	Gi
0	0	1	1	1
$\alpha_{1,2}$	0	$\omega_2$	$\gamma_2$	1
1	0	0	1	1
0	1	0	0	0
$\alpha_{1,2}$	1	0	$\alpha_0$	$\alpha$
1	1	0	1	1
0	0	1	1	1
$\alpha_{1,2}$	$\alpha_0$	$\omega_0$	$\gamma_0$	$\gamma$
1	1	0	1	1
0	1	0	0	0
$\alpha_{1,2}$	$\omega_0$	$\lambda_0$	$\alpha_0$	$\alpha$
1	0	0	1	1
0	0	1	1	1
$\alpha_{1,2}$	$\lambda_0$	$\omega_0$	$\gamma_0$	$\gamma$
1	0	0	1	1
0	1	0	0	0
$\alpha_{1,2}$	$\gamma_0$	$\lambda_0$	$\alpha_0$	$\alpha$
1	1	0	1	1

Правило вычисления модифицированного выходного вектора  $\vec{G}_i$ , фильтрованного выходного вектора  $\vec{G}_D$  и будущего свободного выходного вектора  $\vec{G}_F$  дано в табл. 7, отличающейся от приведенной в работе [3] использованием шести-значного представления сигнала.

Таблица 7

$\vec{G}_F$	$G_i$	$\vec{G}_i$	$\vec{G}_D$	$\vec{G}_F$
$([0, t_1], [*, *], [*, *])$	1	$(\alpha, 1)$	$(0, \alpha, 1)$	$([0, t_1], [\alpha, t_1 + A], [1, t_1 + B])$
$([1, t_1], [*, *], [*, *])$	0	$(\omega, 0)$	$(1, \omega, 0)$	$([1, t_1], [1, \omega, t_1 + C], [0, t_1 + D])$
$([0, t_1], [*, t_2], [*, *])$	1	$(1, *)$	$(0, \alpha, 1)$	$([0, t_1], [\alpha, t_2], [1, t_1 + B])$
$([1, t_1], [1, t_2], [*, *])$	0	$(0, *)$	$(1, \omega, 0)$	$([1, t_1], [1, \omega, t_2], [0, t_1 + D])$
$([0, t_1], [1, t_2], [*, *])$	0	$(0, *)$	$(0, \lambda, 0)$	$([0, t_1], [1, \lambda, t_2], [0, t_1 + D])$
$([1, t_1], [1, t_2], [*, *])$	1	$(1, *)$	$(1, \gamma, 1)$	$([1, t_1], [1, \gamma, t_2], [1, t_1 + B])$
$([0, t_1], [*, *], [*, *])$	$\alpha$	$(\alpha, *)$	$(0, \alpha, *)$	$([0, t_1], [1, \alpha, t_1 + A], [*, *])$
$([0, t_1], [*, *], [*, *])$	$\lambda$	$(\lambda, *)$	$(0, \lambda, *)$	$([0, t_1], [1, \lambda, t_1 + A], [*, *])$
$([1, t_1], [*, *], [*, *])$	$\omega$	$(\omega, *)$	$(1, \omega, *)$	$([1, t_1], [1, \omega, t_1 + C], [*, *])$
$([1, t_1], [*, *], [*, *])$	$\gamma$	$(\gamma, *)$	$(1, \gamma, *)$	$([1, t_1], [1, \gamma, t_1 + C], [*, *])$

Продолжение табл. 7

$\vec{G}_F$	$G_i$	$\vec{G}_i$	$\vec{G}_D$	$\vec{G}_F$
$([\alpha, t_1], [x], [x])$	1	$(1, x)$	$(\alpha, 1, x)$	$([\alpha, t_1], [1, t_1 + B], [x])$
$([\omega, t_1], [x], [x])$	0	$(0, x)$	$(\omega, 0, x)$	$([\omega, t_1], [0, t_1 + D], [x])$
$([\lambda, t_1], [x], [x])$	0	$(0, x)$	$(\lambda, 0, x)$	$([\lambda, t_1], [0, t_1 + D], [x])$
$([\gamma, t_1], [x], [x])$	1	$(1, x)$	$(\gamma, 1, x)$	$([\gamma, t_1], [1, t_1 + B], [x])$
$([0, t_1], [1, t_2], [x])$	$\alpha$	$(\alpha, x)$	$(0, \alpha, x)$	$([0, t_1], [\alpha, t_1 + A], [x])$
$([1, t_1], [0, t_2], [x])$	$\omega$	$(\omega, x)$	$(1, \omega, x)$	$([1, t_1], [\omega, t_1 + C], [x])$
$([0, t_1], [1, t_2], [x])$	$\lambda$	$(\lambda, x)$	$(0, \lambda, x)$	$([0, t_1], [\lambda, t_1 + A], [x])$
$([0, t_1], [1, t_2], [x])$	0	$(\omega, 0)$	$(\omega, 0, x)$	$([\omega, t_1], [0, t_1 + D], [x])$
$([1, t_1], [0, t_2], [x])$	1	$(\alpha, 1)$	$(\alpha, 1, x)$	$([\alpha, t_1], [1, t_1 + B], [x])$
$([\lambda, t_1], [0, t_2], [x])$	1	$(\alpha, 1)$	$(\alpha, 1, x)$	$([\alpha, t_1], [1, t_1 + B], [x])$
$([\gamma, t_1], [1, t_2], [x])$	0	$(\omega, 0)$	$(\omega, 0, x)$	$([\omega, t_1], [0, t_1 + D], [x])$
$([1, t_1], [0, t_2], [x])$	$\gamma$	$(\gamma, x)$	$(1, \gamma, x)$	$([1, t_1], [\gamma, t_1 + C], [x])$
$([0, t_1], [\alpha, t_2], [x])$	$\alpha$	$(\alpha, x)$	$(0, \alpha, x)$	$([0, t_1], [\alpha, t_1 + A], [x])$
$([1, t_1], [\omega, t_2], [0, t_3])$	$\omega$	$(\omega, x)$	$(1, \omega, x)$	$([1, t_1], [\omega, t_1 + C], [x])$
$([0, t_1], [\lambda, t_2], [0, t_3])$	$\lambda$	$(\lambda, x)$	$(0, \lambda, x)$	$([0, t_1], [\lambda, t_1 + A], [x])$
$([1, t_1], [\gamma, t_2], [1, t_3])$	$\gamma$	$(\gamma, x)$	$(1, \gamma, x)$	$([1, t_1], [\gamma, t_1 + C], [x])$

Примечание. Остальные возможные варианты дают  $\vec{G}_D = (i, *, *)$ .

Результаты практического моделирования структуры (рис. 3) предложенным методом и методом Чаппеля на входных наборах  $X_1 = (00110101)$ ,  $X_2 = (01001010)$  приведены ниже.

	В	Э	Э	Э	Э	Э	Э	Э	Э	Э	Э	Э	Э
Р	Л	Л	Л	Л	Л	Л	Л	Л	Л	Л	Л	Л	Л
Е	Е	Е	Е	Е	Е	Е	Е	Е	Е	Е	Е	Е	Е
М	М	М	М	М	М	М	М	М	М	М	М	М	М
Я	А	А	А	А	А	А	А	А	А	А	А	А	А
	2	3	4	5	6	7	8	9	1	1	2	2	2

0.3		0											1
		XX											XX
		XX											XX
0.6		1											1
		1											XX
		1											XX
0.7	1	1	0		0		1	0					XX
	XX	1	XX	0	XX	XX	XX	XX					XX
	XX	1	XX	0	XX	XX	XX	XX					XX
0.9	XX	1	XX	0	XX	XX	XX	XX	0	XX	0		XX
	XX	1	XX	0	XX	XX	XX	XX	XX	XX	XX		XX
	XX	1	XX	0	XX	XX	XX	XX	XX	XX	XX		XX
1.2	0	1	1	0	1	0	1	XX	0	XX			XX

	0	1	1	0	1	0	1	XX	0	XX			
	0	1	1	0	1	0	1	XX	0	XX			
1.6	0	1	1	0	1	0	1	1	0	XX			
	0	1	1	0	1	0	1	1	0	XX			
	0	1	1	0	1	0	1	1	0	XX			
1.8	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0			
	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0			
	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0			
2.4	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0	1	0	1
	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0	XX	XX	XX
	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0	XX	XX	XX
2.7	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0	XX	XX	XX
	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0	XX	XX	XX
	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0	XX	XX	XX
4.2	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0	XX	XX	XX
	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	XX

Результаты моделирования по методу Чаппеля:

В	Э	Э	Э	Э	Э	Э	Э	Э	Э	Э	Э	Э	Э
Р	Л	Л	Л	Л	Л	Л	Л	Л	Л	Л	Л	Л	Л
Е	Е	Е	Е	Е	Е	Е	Е	Е	Е	Е	Е	Е	Е
М	М	М	М	М	М	М	М	М	М	М	М	М	М
Я	А	А	А	А	А	А	А	А	А	А	А	А	А
	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	0	4	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	9

0.6	1												
	XX												
	XX												
0.9	XX												0
	XX												XX
	XX												XX
1.1	XX	1											XX
	XX	XX											XX
	XX	XX											XX
1.2	0	XX											XX
	0	XX											XX
	0	XX											XX
1.4	0	XX	0										XX
	0	XX	XX										XX
	0	XX	XX										XX
1.6	0	1	XX										XX
	0	1	XX										XX
	0	1	XX										XX
1.7	0	1	XX										1
	0	1	XX										XX
	0	1	XX										XX
1.8	0	1	XX	0									XX
	0	1	XX	0									XX
	0	1	XX	0									XX
2.0	0	1	XX	0									1
	0	1	XX	0									XX
	0	1	XX	0									XX
2.2	0	1	0	0									XX

