

# Способ определения значений ряда опций,

## задающих параметры численных методов в OrCAD

**Определение функциональных зависимостей между опциями  $h_{\max}$ , RELTOL, ITL4, предложенное в данной статье, позволяет существенно расширить область функционирования OrCAD без проблемы неустойчивости численных методов. На базе этих функциональных зависимостей построен алгоритм вычисления набора опций —  $h_{\max}$ , RELTOL, ITL4, позволяющего обеспечить устойчивый процесс моделирования на временном диапазоне от 0 до TSTOP. Разработана процедура, увеличивающая быстродействие работы OrCAD за счет рационального определения опций ABSTOL, VNTOL, CHGTOL по вычисленному значению опции RELTOL, а также приведены примеры использования алгоритма и процедуры и составлены таблицы, определяющие взаимосвязь опций  $h_{\max}$ , RELTOL, ITL4 для заданного времени TSTOP.**

**Алгоритм и процедура могут быть реализованы:**

- 1) при работе с существующими версиями OrCAD на этапе задания настроек моделирования;**
- 2) при разработке последующих версий OrCAD с автоматическим исключением Convergence Problem.**

**Юрий Болотовский,  
к. т. н.**

eltech@ufacom.ru

**Георгий Таназлы,  
к. т. н.**

g\_thanazly@mail.ru

**К** числу наиболее сложных проблем, ограничивающих возможности моделирования в OrCAD, относятся проблемы устойчивости и сходимости численных методов при моделировании, а также управления этими численными методами с помощью опций, предоставляемых разработчиками OrCAD-пользователям. Следует отметить, что процесс управления практически не формализован и немногочисленные инструкции по повышению устойчивости численных методов, приведенные в литературе по OrCAD, носят только рекомендательный характер [1].

Из сказанного становится понятной актуальность следующей задачи — расширение класса анализируемых схем силовой электроники за счет улучшения сходимости методов численного интегрирования путем назначения соответствующих значений управляющих опций и/или схемных решений.

Дадим определения вышеперечисленных опций OrCAD и их значения по умолчанию (приведены в скобках):

- 1) RELTOL — относительная погрешность вычисления токов и напряжений ( $10^{-3}$ );
- 2) VNTOL — абсолютная погрешность вычисления напряжения ( $10^{-6}$ );
- 3) ABSTOL — абсолютная погрешность вычисления тока ( $10^{-12}$ );
- 4) CHGTOL — абсолютная погрешность вычисления заряда ( $10^{-14}$ );
- 5) ITL4 — максимальное количество итераций на одном временном шаге (10).

Кроме этого, настройка численных методов может осуществляться изменением величины максимального временного шага  $h_{\max}$ . По умолчанию значение максимального временного шага:

$$h_{\max} = \frac{TSTOP}{50}, \quad (1)$$

где TSTOP — время окончания анализа.

Для оценки и сравнения эффективности назначения различных наборов опций предлагается следующее.

Для конкретной схемы модели каждый набор опций характеризуется величиной времени до остановки счета и выдачи сообщения о невозможности его продолжения из-за наступления неустойчивости (Convergence Problem), далее — время наработки до конвергенции,  $T_{\text{CONV}}$ .

Лучшим является набор опций, обеспечивающих большее время наработки до конвергенции. Если набор обеспечивает анализ схемы на всем времени TSTOP без остановки из-за неустойчивости, то набор управляющих опций называется беспроблемным. Вообще говоря, для каждой схемы модели может существовать множество беспроблемных наборов опций с числом элементов более 1.

Введем дополнительный критерий точности для проверки пригодности результатов моделирования, полученных с помощью беспроблемного набора управляющих опций. Под точностью понимается отсутствие неперiodических огибающих на осциллограммах мгновенных значений переменных или разброс амплитуд неперiodических огибаю-

щих в установившемся режиме в допустимых для пользователя пределах [2].

Рассмотрим одну из причин численной неустойчивости, которая сводится к тому, что минимально допустимый шаг  $h_{\min}$  (minimum allowable step size) больше, чем требуемый для сохранения устойчивости шаг  $h_{\min}^*$  (time step).

В [3] для определения  $h_{\min}$  по значениям управляющих опций приводится следующая формула:

$$h_{\min} = \frac{TSTOP}{10^{15-B}}, \quad (2)$$

В показателе степени  $B$  определяется числом знаков после запятой в управляющей опции RELTOL, а число 15 — двойной точностью разрядной сетки вычислительной машины.

Данная формула является приближенной, поскольку исключает возможность использования значения RELTOL, не дольного степеням числа 10. Это существенно сужает возможность нахождения беспроблемного набора управляющих опций.

Приведем уточненный вариант формулы для нахождения минимального шага  $h_{\min}$ :

$$h_{\min} = \frac{TSTOP}{10^{15} \times RELTOL} \quad (3)$$

Действительно, при  $RELTOL = 10^{-B}$  из формулы (3) как частный случай получается формула (2).

Данная формула следует из формулы:

$$\Delta_r = f_0 \frac{(b-a)^2}{h} \times 10^{-M+1}$$

для погрешности округления численных методов интегрирования [4],

где  $\Delta_r$  — погрешность округления;

$M$  — число разрядов сетки;

$a$  и  $b$  — левая и правая границы интервала интегрирования;

$f_0$  — максимальное значение функции на отрезке  $[a; b]$ .

Формула (3) позволяет определять  $h_{\min}$  при произвольном значении RELTOL. Достоверность формулы (3) подтверждается многочисленными экспериментами, проведенными при моделировании различных схем силовой электроники в OrCAD при использовании дольных значений RELTOL.

Очевидно, что для облегчения решения задачи нахождения эффективного (в пределе — беспроблемного) набора управляющих опций можно предложить два способа.

- 1) Нахождение функциональных зависимостей между некоторым количеством управляющих опций, что снизит число переборов, необходимых для их эффективного или беспроблемного подбора.
- 2) Назначение некоторого количества опций, исходя из особенностей анализируемой модели.

Очевидно, что возможен комбинированный способ, объединяющий два перечисленных.

В рамках реализации первого способа авторы предлагают следующее.

Рассмотрим отношение величины максимального шага  $h_{\max}$  к величине минимального  $h_{\min}$ . Введем допущение о том, что величина

на минимального шага формируется из величины максимального шага методом деления отрезка пополам. Тогда:

$$\frac{h_{\max}}{h_{\min}} = 2^{ITL4}. \quad (4)$$

Преобразуем (4) для случая назначения  $h_{\max}$  по умолчанию, подставив в (4) формулы (1) и (3).

Получим:

$$2^{ITL4} = 2 \times 10^{13} \times RELTOL. \quad (5)$$

Отсюда следует:

$$ITL4 = ROUND \times \times (1 + \log_2(RELTOL \times 10^{13})). \quad (6)$$

Теперь преобразуем (4) для случая, когда максимальная величина шага  $h_{\max}$  задается пользователем и не связана с TSTOP.

С помощью аналогичных преобразований получим:

$$ITL4 = ROUND \times \times (\log_2(\frac{h_{\max} \times RELTOL \times 10^{15}}{TSTOP})). \quad (7)$$

Операция ROUND () в формулах (6, 7) обозначает округление числа до целого.

Приведем формулы, позволяющие вычислять значение RELTOL, исходя из (6) и (7).

$$RELTOL = \frac{2^{ITL4-1}}{10^{13}} \quad (8)$$

для  $h_{\max}$ , заданного по умолчанию;

$$RELTOL = \frac{2^{ITL4} \times TSTOP}{h_{\max} \times 10^{15}} \quad (9)$$

для  $h_{\max}$ , заданного принудительно.

Количество значащих цифр после запятой в формулах (8, 9) ограничивается шестью, что определяется точностью представления опции RELTOL в САПР OrCAD — шесть знаков после запятой.

Легко показать, что формула (6) является частным случаем формулы (7), а формула (8) — частным случаем формулы (9).

При эксплуатации OrCAD установлено: в случае возникновения проблемы конвергенции, вызванной несоответствием между  $h_{\min}$  и  $h_{\min}^*$ , попытка устранить это несоответствие путем уменьшения величины  $h_{\min}$  за счет уменьшения TSTOP или увеличения RELTOL (см. формулу 2) зачастую приводит к одновременному уменьшению  $h_{\min}^*$ , что не позволяет избежать проблемы конвергенции.

Предлагается следующий алгоритм вычисления опций  $h_{\max}$ , RELTOL, ITL4. Исходными данными для предлагаемого алгоритма являются время окончания анализа TSTOP, величина максимального шага  $h_{\max}$ , минимально допустимая для пользователя величина максимального шага  $h_{\max}^*$  (чаще всего  $h_{\max}^*$  назначается из соображений допустимого времени моделирования) и максимальный разброс амплитуд неперiodических огибающих в установившемся режиме в допустимых для пользователя пределах  $\Delta A$ .

**Шаг 1.** Анализ рассматриваемой модели производится при значениях управляющих

опций по умолчанию и заданном пользователем значении TSTOP. В случае если данный набор управляющих опций является беспроблемным, то алгоритм завершен.

**Шаг 2.** Для заданного значения TSTOP экспериментально подбирается начальное приближение RELTOL<sub>BP</sub>, по которому находятся значения ITL4 и RELTOL по формулам (7) и (9), так что значение RELTOL получается порядка 0,001–0,002.

**Шаг 3.** Используя полученные значения ITL4 и RELTOL, осуществляется попытка анализа рассматриваемой модели. Если попытка успешна (удалось произвести анализ до времени TSTOP без возникновения проблемы конвергенции (Convergence Problem)), то считается, что найден беспроблемный набор управляющих опций. Переход к шагу 14.

**Шаг 4.** Фиксируются значения (из выходного файла \*.out):

- время наработки до конвергенции  $T_{CONV}$ ;
- минимальный шаг интегрирования  $h_{\min}$ ;
- требуемый для сохранения устойчивости минимальный шаг  $h_{\min}^*$ ;
- вычисление разности  $\Delta h = h_{\min} - h_{\min}^*$ .

**Шаг 5.** Проверяется, не превосходит ли значение RELTOL величины 0,1. В случае если превосходит, перейти к шагу 12.

**Шаг 6.** Значение ITL4 увеличивается на 1. Рассчитывается новое значение RELTOL.

**Шаг 7.** Используя полученные значения ITL4 и RELTOL, выполняется попытка анализа рассматриваемой модели. Если попытка успешна (удалось произвести анализ до времени TSTOP без возникновения проблемы конвергенции (Convergence Problem)), то считается, что найден беспроблемный набор управляющих опций. Переход к шагу 14.

**Шаг 8.** Фиксируются значения (из выходного файла \*.out):

- время наработки до конвергенции  $T_{CONV}$ ;
- минимальный шаг интегрирования  $h_{\min}$ ;
- требуемый для сохранения устойчивости минимальный шаг  $h_{\min}^*$ ;
- вычисление разности  $\Delta h = h_{\min} - h_{\min}^*$ .

**Шаг 9.** Полученное значение  $T_{CONV}$  сравнивается с предыдущим. В случае если полученное  $T_{CONV}$  меньше предыдущего, то переходим к шагу 12. В случае если полученное  $T_{CONV}$  больше предыдущего, то переходим к шагу 5. В случае если на предыдущем наборе ITL4, RELTOL был получен беспроблемный набор управляющих опций, не удовлетворяющий критерию точности, то переход к шагу 5.

**Шаг 10.** Полученное значение  $\Delta h$  сравнивается с предыдущим. В случае если полученное  $\Delta h$  больше предыдущего, то переходим к шагу 12.

**Шаг 11.** Переход к шагу 5.

**Шаг 12.** Назначается новое значение  $h_{\max}$ .

**Шаг 13.** Значение  $h_{\max}$  сравнивается с  $h_{\max}^*$ . Если оно меньше, то алгоритм не дает решения, иначе переход к шагу 2.

**Шаг 14.** Проверка результата моделирования, полученного при беспроблемном наборе управляющих опций на точность. В случае если точность удовлетворяет критерию, то работа алгоритма завершена, иначе переход к шагу 6.

**Таблица 1.** Значения I<sub>TL4</sub> и RELTOL для TSTOP = 100 ms, 50 ms, 25 ms, 12,5 ms

№	h <sub>max</sub>	100 ms		50 ms		25 ms		12,5 ms	
		ITL4	RELTOL	ITL4	RELTOL	ITL4	RELTOL	ITL4	RELTOL
1	10 <sup>-3</sup>	34	0,001718	35	0,001718	36	0,001718	37	0,001718
2		35	0,003436	36	0,003436	37	0,003436	38	0,003436
3		36	0,006872	37	0,006872	38	0,006872	39	0,006872
4		37	0,013744	38	0,013744	39	0,013744	40	0,013744
5		38	0,027488	39	0,027488	40	0,027488	41	0,027488
6		39	0,054976	40	0,054976	41	0,054976	42	0,054976
7		40	0,109952	41	0,109952	42	0,109952	43	0,109952
8	10 <sup>-4</sup>	30	0,0010738	31	0,0010738	32	0,0010738	33	0,0010738
9		31	0,0021475	32	0,0021475	33	0,0021475	34	0,0021475
10		32	0,0042950	33	0,0042950	34	0,0042950	35	0,0042950
11		33	0,0085900	34	0,0085900	35	0,0085900	36	0,0085900
12		34	0,0171800	35	0,0171800	36	0,0171800	37	0,0171800
13		35	0,0343600	36	0,0343600	37	0,0343600	38	0,0343600
14		36	0,0687200	37	0,0687200	38	0,0687200	39	0,0687200
15	37	0,1374400	38	0,1374400	39	0,1374400	40	0,1374400	
16	10 <sup>-5</sup>	27	0,0013422	28	0,0013422	29	0,0013422	30	0,0013422
17		28	0,0026844	29	0,0026844	30	0,0026844	31	0,0026844
18		29	0,0053688	30	0,0053688	31	0,0053688	32	0,0053688
19		30	0,0107376	31	0,0107376	32	0,0107376	33	0,0107376
20		31	0,0214752	32	0,0214752	33	0,0214752	34	0,0214752
21		32	0,0429504	33	0,0429504	34	0,0429504	35	0,0429504
22		33	0,0859008	34	0,0859008	35	0,0859008	36	0,0859008
23	34	0,1718016	35	0,1718016	36	0,1718016	37	0,1718016	
24	10 <sup>-6</sup>	24	0,0016777	25	0,0016777	26	0,0016777	27	0,0016777
25		25	0,0033554	26	0,0033554	27	0,0033554	28	0,0033554
26		26	0,0067108	27	0,0067108	28	0,0067108	29	0,0067108
27		27	0,0134216	28	0,0134216	29	0,0134216	30	0,0134216
28		28	0,0268432	29	0,0268432	30	0,0268432	31	0,0268432
29		29	0,0536864	30	0,0536864	31	0,0536864	32	0,0536864
30		30	0,1073728	31	0,1073728	32	0,1073728	33	0,1073728
31	10 <sup>-7</sup>	20	0,0010485	21	0,0010485	22	0,0010485	23	0,0010485
32		21	0,0020971	22	0,0020971	23	0,0020971	24	0,0020971
33		22	0,0041943	23	0,0041943	24	0,0041943	25	0,0041943
34		23	0,0083886	24	0,0083886	25	0,0083886	26	0,0083886
35		24	0,0167772	25	0,0167772	26	0,0167772	27	0,0167772
36		25	0,0335544	26	0,0335544	27	0,0335544	28	0,0335544
37		26	0,0671088	27	0,0671088	28	0,0671088	29	0,0671088
38	27	0,1342176	28	0,1342176	29	0,1342176	30	0,1342176	
39	10 <sup>-8</sup>	17	0,0013107	18	0,0013107	19	0,0013107	20	0,0013107
40		18	0,0026214	19	0,0026214	20	0,0026214	21	0,0026214
41		19	0,0052429	20	0,0052429	21	0,0052429	22	0,0052429
42		20	0,0104858	21	0,0104858	22	0,0104858	23	0,0104858
43		21	0,0209716	22	0,0209716	23	0,0209716	24	0,0209716
44		22	0,0419432	23	0,0419432	24	0,0419432	25	0,0419432
45		23	0,0838864	24	0,0838864	25	0,0838864	26	0,0838864
46	24	0,1677728	25	0,1677728	26	0,1677728	27	0,1677728	

Для упрощения работы пользователя по приведенному алгоритму для ряда значений TSTOP (100 ms, 50 ms, 25 ms, 12,5 ms, 1 ms, 0,5 ms, 0,25 ms, 0,125 ms, 10 us, 5 us, 2,5 us, 1,25 us) и h<sub>max</sub>\* = 10<sup>-8</sup> рассчитаны значения I<sub>TL4</sub> и RELTOL, которые сведены в таблицы 1–3.

Для таблиц 1–3 характерны следующие закономерности:

- в случае изменения значения TSTOP в 2 раза, для одного и того же значения RELTOL значения I<sub>TL4</sub> отличаются на 1 (строка таблицы);
- для одного и того же значения TSTOP при изменении значения I<sub>TL4</sub> на 1, значение RELTOL изменяется в 2 раза.

При необходимости данные закономерности позволяют легко расширить интервалы изменения h<sub>max</sub> и TSTOP.

Поясним работу вышеприведенного алгоритма на примере 1 (рис. 1).

#### Пример 1

В качестве примера выбрана модель мостового тиристорного инвертора с обратным диодом, включенным параллельно мосту. Модель запитана от источника постоянного напряжения 20 В. Диод D2 поставлен для того, чтобы имитировать работу выпрямителя и предотвратить возможность протекания обратных токов.

В модели применяются тиристоры 2N4444 (модель из библиотеки thyristr.lib), диоды

**Таблица 2.** Значения I<sub>TL4</sub> и RELTOL для TSTOP = 1000 us, 500 us, 250 us, 125 us

№	h <sub>max</sub>	1000 us		500 us		250 us		125 us	
		ITL4	RELTOL	ITL4	RELTOL	ITL4	RELTOL	ITL4	RELTOL
1	10 <sup>-5</sup>	34	0,001718	35	0,001718	36	0,001718	37	0,001718
2		35	0,003436	36	0,003436	37	0,003436	38	0,003436
3		36	0,006872	37	0,006872	38	0,006872	39	0,006872
4		37	0,013744	38	0,013744	39	0,013744	40	0,013744
5		38	0,027488	39	0,027488	40	0,027488	41	0,027488
6		39	0,054976	40	0,054976	41	0,054976	42	0,054976
7		40	0,109952	41	0,109952	42	0,109952	43	0,109952
8	10 <sup>-6</sup>	30	0,0010740	31	0,0010740	32	0,0010740	33	0,0010740
9		31	0,0021475	32	0,0021475	33	0,0021475	34	0,0021475
10		32	0,0042950	33	0,0042950	34	0,0042950	35	0,0042950
11		33	0,0085900	34	0,0085900	35	0,0085900	36	0,0085900
12		34	0,0171800	35	0,0171800	36	0,0171800	37	0,0171800
13		35	0,0343600	36	0,0343600	37	0,0343600	38	0,0343600
14		36	0,0687200	37	0,0687200	38	0,0687200	39	0,0687200
15	37	0,1374400	38	0,1374400	39	0,1374400	40	0,1374400	
16	10 <sup>-7</sup>	27	0,0013422	28	0,0013422	29	0,0013422	30	0,0013422
17		28	0,0026844	29	0,0026844	30	0,0026844	31	0,0026844
18		29	0,0053688	30	0,0053688	31	0,0053688	32	0,0053688
19		30	0,0107376	31	0,0107376	32	0,0107376	33	0,0107376
20		31	0,0214752	32	0,0214752	33	0,0214752	34	0,0214752
21		32	0,0429504	33	0,0429504	34	0,0429504	35	0,0429504
22		33	0,0859008	34	0,0859008	35	0,0859008	36	0,0859008
23	34	0,1718016	35	0,1718016	36	0,1718016	37	0,1718016	
24	10 <sup>-8</sup>	24	0,0016777	25	0,0016777	26	0,0016777	27	0,0016777
25		25	0,0033554	26	0,0033554	27	0,0033554	28	0,0033554
26		26	0,0067108	27	0,0067108	28	0,0067108	29	0,0067108
27		27	0,0134216	28	0,0134216	29	0,0134216	30	0,0134216
28		28	0,0268432	29	0,0268432	30	0,0268432	31	0,0268432
29		29	0,0536864	30	0,0536864	31	0,0536864	32	0,0536864
30		30	0,1073728	31	0,1073728	32	0,1073728	33	0,1073728

**Таблица 3.** Значения I<sub>TL4</sub> и RELTOL для TSTOP = 10 us, 5 us, 2,5 us, 1,25 us

№	h <sub>max</sub>	10 us		5 us		2,5 us		1,25 us	
		ITL4	RELTOL	ITL4	RELTOL	ITL4	RELTOL	ITL4	RELTOL
1	10 <sup>-7</sup>	34	0,001718	35	0,001718	36	0,001718	37	0,001718
2		35	0,003436	36	0,003436	37	0,003436	38	0,003436
3		36	0,006872	37	0,006872	38	0,006872	39	0,006872
4		37	0,013744	38	0,013744	39	0,013744	40	0,013744
5		38	0,027488	39	0,027488	40	0,027488	41	0,027488
6		39	0,054976	40	0,054976	41	0,054976	42	0,054976
7		40	0,109952	41	0,109952	42	0,109952	43	0,109952
8	10 <sup>-8</sup>	30	0,0010740	31	0,0010740	32	0,0010740	33	0,0010740
9		31	0,0021475	32	0,0021475	33	0,0021475	34	0,0021475
10		32	0,0042950	33	0,0042950	34	0,0042950	35	0,0042950
11		33	0,0085900	34	0,0085900	35	0,0085900	36	0,0085900
12		34	0,0171800	35	0,0171800	36	0,0171800	37	0,0171800
13		35	0,0343600	36	0,0343600	37	0,0343600	38	0,0343600
14		36	0,0687200	37	0,0687200	38	0,0687200	39	0,0687200
15	37	0,1374400	38	0,1374400	39	0,1374400	40	0,1374400	

hfa08tb60 (библиотека моделей фирмы International Rectifier, [www.irf.com](http://www.irf.com)). Листинги моделей приведены ниже.

#### 1. Модель тиристора 2N4444

```
.subckt 2N4444 anode gate cathode
* «Typical» parameters
X1 anode gate cathode Scr params:
+ Vdrm=600v Vrrm=600v Ih=6ma Vtm=1.0v Itm=5
+ dVdt=5e7 Igt=7ma Vgt=0.75v Ton=1u Toff=15u
+ Idm=10u
* 90-5-18 Motorola DL137, 1985 OB
.ends
```

#### 2. Модель диода hfa08tb60

```
*****
* Model Generated by MODPEX *
* Copyright(c) Symmetry Design Systems *
* All Rights Reserved *
```

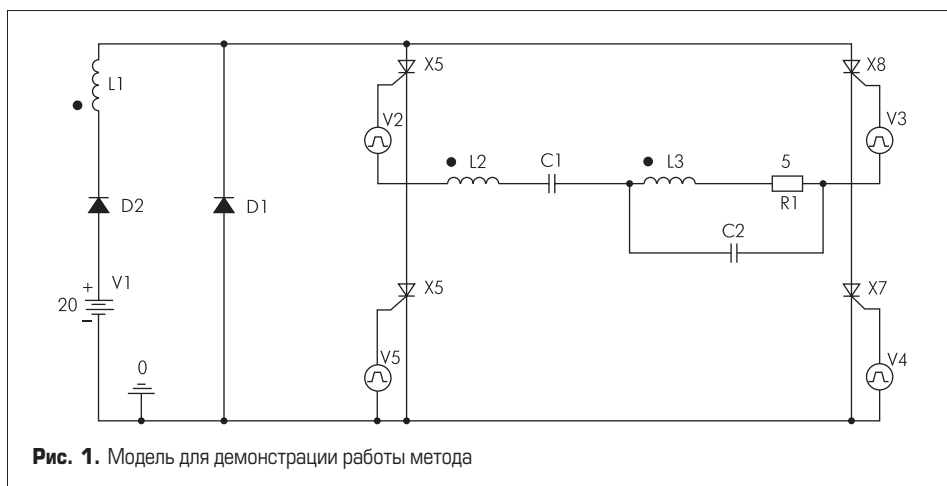


Рис. 1. Модель для демонстрации работы метода

\* UNPUBLISHED LICENSED SOFTWARE \*

\* Contains Proprietary Information \*

\* Which is The Property of \*

\* SYMMETRY OR ITS LICENSORS \*

\* Commercial Use or Resale Restricted \*

\* by Symmetry License Agreement \*

\*\*\*\*\*

\* Model generated on Jan 30, 02

\* MODEL FORMAT: SPICE3

.MODEL hfa08tb60 d

+IS=2.88464e-12 RS=0.0305193 N=2 EG=1.29955

+XTI=0.521907 BV=600 IBV=0.0001 CJO=1.37419e-10

+VJ=0.4 M=0.418241 FC=0.5 TT=1e-09

+KF=0 AF=1

Для управления тиристорами используются импульсные источники напряжения VPULSE (из библиотеки source.lib), параметры которых приведены на схеме (рис. 1). Тиристоры X5 и X7, а также X6 и X8 включаются одновременно в противофазе. Параметры остальных элементов схемы приведены на рис. 1. В случае если хотя бы один из параметров схемы изменен, схема считается новой и к ней необходимо применять с начала приведенный выше алгоритм.

Исходные данные к алгоритму: TSTOP = 100 мс,  $h_{\max} = 10^{-3}$  с,  $h_{\max}^* = 10^{-7}$  с,  $\Delta A = 0,15$  А. Под  $\Delta A$  для рассматриваемого примера понимается разность максимума и минимума амплитуд мгновенного значения тока диода I (D1) на интервале от 60 до 100 мс (установившийся режим) [2].

**Шаг 1.** Попытка проведения анализа с управляющими опциями, заданными по умолчанию. Результат: проблема конвергенции.

**Шаг 2.** Подобрано начальное приближение, обеспечивающее получение ITL4 = 34, RELTOL = 0,001718 (табл. 1, строка 1).

**Шаг 3.** Попытка проведения анализа с ITL4 = 34, RELTOL = 0,001718. Результат: проблема конвергенции.

**Шаг 4.**  $T_{\text{CONV}} = 2,001 \times 10^{-3}$  с,  
 $h_{\min} = 58,21 \times 10^{-15}$  с,  $h_{\min}^* = 15,94 \times 10^{-15}$  с,  
 $\Delta h = 42,27 \times 10^{-15}$  с.

**Шаг 5.** RELTOL = 0,001718 < 0,1.

**Шаг 6.** ITL4 = 35. RELTOL = 0,003436 (табл. 1, строка 2).

**Шаг 7.** Попытка проведения анализа с ITL4 = 35. RELTOL = 0,003436. Результат: проблема конвергенции.

**Шаг 8.**  $T_{\text{CONV}} = 2,544 \times 10^{-3}$  с,  
 $h_{\min} = 29,10 \times 10^{-15}$  с,  $h_{\min}^* = 14,65 \times 10^{-15}$  с,  
 $\Delta h = 14,45 \times 10^{-15}$  с.

**Шаг 9.** Сравниваем  $T_{\text{CONV}}$  с предыдущим значением.  $2,1 \times 10^{-3} > 1,001 \times 10^{-3}$ . Переход к шагу 5.

**Шаг 5.** RELTOL = 0,003436 < 0,1.

**Шаг 6.** ITL4 = 36. RELTOL = 0,006872 (табл. 1, строка 3).

**Шаг 7.** Попытка проведения анализа с ITL4 = 36. RELTOL = 0,006872. Результат: проблема конвергенции.

**Шаг 8.**  $T_{\text{CONV}} = 7,542 \times 10^{-3}$  с,  
 $h_{\min} = 14,55 \times 10^{-15}$  с,  $h_{\min}^* = 5,961 \times 10^{-15}$  с,  
 $\Delta h = 8,589 \times 10^{-15}$  с.

**Шаг 9.** Сравниваем  $T_{\text{CONV}}$  с предыдущим значением.  $7,542 \times 10^{-3} > 2,1 \times 10^{-3}$ . Переход к шагу 5.

**Шаг 5.** RELTOL = 0,006872 < 0,1.

**Шаг 6.** ITL4 = 37. RELTOL = 0,013744 (табл. 1, строка 4).

**Шаг 7.** Попытка проведения анализа с ITL4 = 37. RELTOL = 0,013744. Результат: проблема конвергенции.

**Шаг 8.**  $T_{\text{CONV}} = 501,1 \times 10^{-6}$  с,  
 $h_{\min} = 7,276 \times 10^{-15}$  с,  $h_{\min}^* = 3,066 \times 10^{-15}$  с,  
 $\Delta h = 4,21 \times 10^{-15}$  с.

**Шаг 9.** Сравниваем  $T_{\text{CONV}}$  с предыдущим значением.  $501,1 \times 10^{-6} < 7,542 \times 10^{-3}$ . Переход к шагу 12.

**Шаг 12.** Задаем значение  $h_{\max} = 10^{-4}$ .

**Шаг 13.**  $h_{\max} > h_{\max}^*$  ( $10^{-4} > 10^{-7}$ ). Переход к шагу 2.

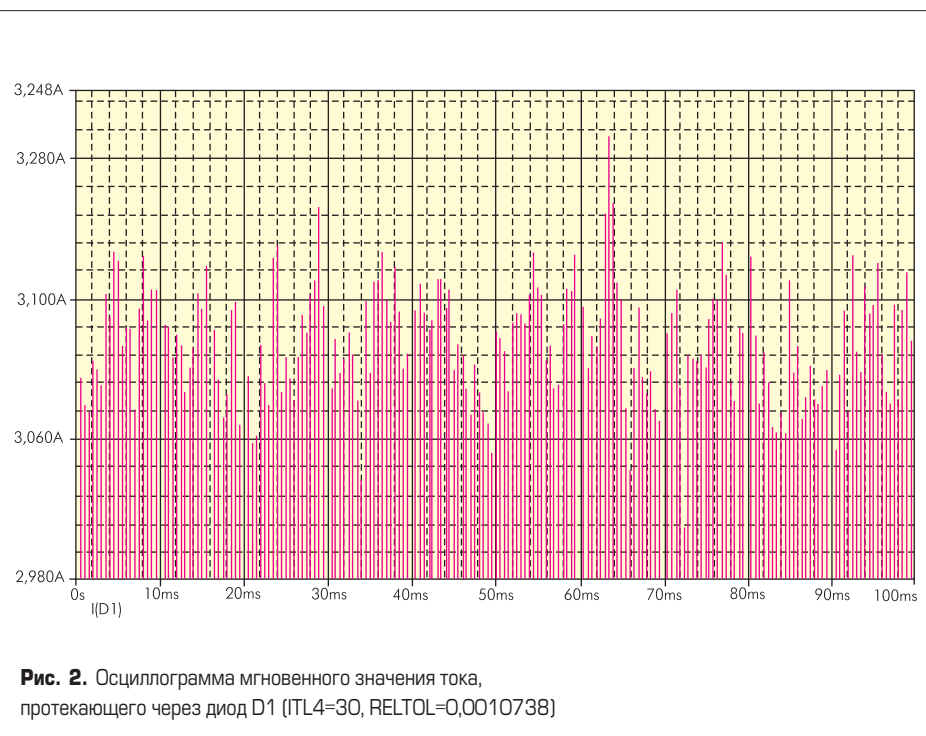
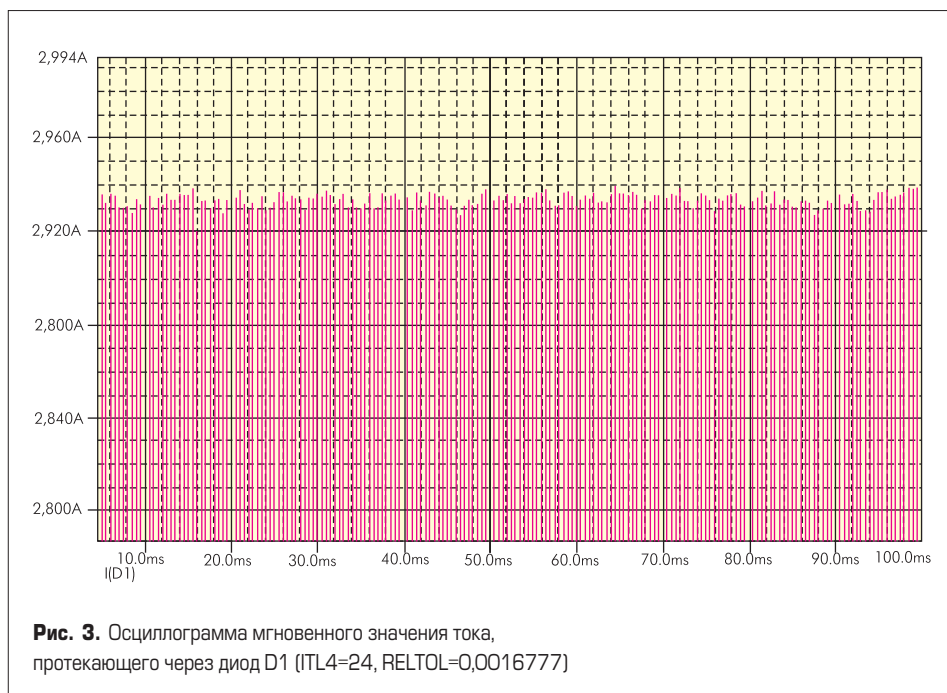


Рис. 2. Осциллограмма мгновенного значения тока, протекающего через диод D1 (ITL4=30, RELTOL=0,0010738)



**Шаг 4.**  $T_{CONV} = 1,001 \times 10^{-3}$  с,  
 $h_{min} = 74,5 \times 10^{-15}$  с,  $h_{min}^* = 14,36 \times 10^{-15}$  с,  
 $\Delta h = 60,14 \times 10^{-15}$  с.

**Шаг 5.** RELTOL = 0,0013422 < 0,1.

**Шаг 6.** ITL4 = 28, RELTOL = 0,0026844.

**Шаг 7.** Попытка проведения анализа с ITL4 = 28. RELTOL = 0,0026844. Результат: проблема конвергенции.

**Шаг 8.**  $T_{CONV} = 2,001 \times 10^{-3}$  с,  
 $h_{min} = 37,25 \times 10^{-15}$  с,  $h_{min}^* = 23,36 \times 10^{-15}$  с,  
 $\Delta h = 14,89 \times 10^{-15}$  с.

**Шаг 9.** Сравниваем  $T_{CONV}$  с предыдущим значением.  $2,001 \times 10^{-3} > 1,001 \times 10^{-3}$ . Переход к шагу 5.

**Шаг 5.** RELTOL = 0,0026844 < 0,1.

**Шаг 6.** ITL4 = 29, RELTOL = 0,0053688 (табл. 1, строка 18).

**Шаг 7.** Попытка проведения анализа с ITL4 = 29. RELTOL = 0,0053688. Результат: проблема конвергенции.

**Шаг 8.**  $T_{CONV} = 15,000 \times 10^{-3}$  с,  
 $h_{min} = 18,63 \times 10^{-15}$  с,  $h_{min}^* = 11,92 \times 10^{-15}$  с,  
 $\Delta h = 6,71 \times 10^{-15}$  с.

**Шаг 9.** Сравниваем  $T_{CONV}$  с предыдущим значением.  $15,000 \times 10^{-3} > 2,001 \times 10^{-3}$ . Переход к шагу 5.

**Шаг 5.** RELTOL = 0,0053688 < 0,1.

**Шаг 6.** ITL4 = 30, RELTOL = 0,0107376 (табл. 1, строка 19).

**Шаг 7.** Попытка проведения анализа с ITL4 = 30. RELTOL = 0,0107376. Результат: проблема конвергенции.

**Шаг 8.**  $T_{CONV} = 1,001 \times 10^{-3}$  с,  
 $h_{min} = 9,313 \times 10^{-15}$  с,  $h_{min}^* = 3,151 \times 10^{-15}$  с,  
 $\Delta h = 6,162 \times 10^{-15}$  с.

**Шаг 9.** Сравниваем  $T_{CONV}$  с предыдущим значением.  $1,001 \times 10^{-3} < 15,000 \times 10^{-3}$ . Переход к шагу 12.

**Шаг 12.** Задаем значение  $h_{max} = 10^{-6}$ .

**Шаг 13.**  $h_{max} > h_{max}^*$ . ( $10^{-6} > 10^{-7}$ ). Переход к шагу 2.

**Шаг 2.** Подобрано начальное приближение, обеспечивающее получение ITL4 = 24, RELTOL = 0,0016777 (табл. 1, строка 24).

**Шаг 3.** Попытка проведения анализа с ITL4 = 24, RELTOL = 0,0016777. Результат:

**Таблица 4.** Беспроблемные наборы управляющих опций, полученные для схемы (рис. 1), с применением разработанного алгоритма

№	$h_{max}$	ITL4	RELTOL	$T_{JT}$ , с	$I_{Dmax}$	$\Delta A$
1	$10^{-6}$	24	0,0016777	299,68	2,9408	0,0143
2	$10^{-6}$	25	0,0033554	199,42	2,9521	0,0232
3	$10^{-6}$	26	0,0067108	182,86	2,9516	0,0213
4	$10^{-6}$	27	0,0134216	183,62	2,9792	0,0794
5	$10^{-6}$	28	0,0268432	182,30	3,0147	0,1518
6	$10^{-6}$	29	0,0536864	181,94	3,0767	0,1744
7	$10^{-6}$	30	0,1073728	181,57	3,2636	0,5570
8	$10^{-7}$	20	0,0010486	1435,04	2,9332	0,0004
9	$10^{-7}$	21	0,0020972	1371,60	2,9287	0,0090
10	$10^{-7}$	22	0,0041943	1334,97	2,9357	0,0247
11	$10^{-7}$	23	0,0083886	1344,95	2,9471	0,0493
12	$10^{-7}$	24	0,0167772	1306,73	2,9695	0,0924
13	$10^{-7}$	25	0,0345544	1330,44	3,0016	0,1769
14	$10^{-7}$	26	0,0671088	1403,07	3,1094	0,3816
15	$10^{-7}$	27	0,1342176	1317,16	2,9561	0,4095
16	$10^{-8}$	17	0,0013107	1533,38 (12%)	Probe file size exceeds 2 000 000 000	

$T_{JT} = 299,68$  с. Для TSTOP =  $100 \times 10^{-3}$  с,  $h_{max} = 10^{-6}$  найден беспроблемный набор управляющих опций: ITL4 = 24, RELTOL = 0,001677 (рис. 3). Переход к шагу 14.

**Шаг 14.** Результат проверяется по критерию точности. По рис. 3 определяем  $\Delta A = 2,9408 - 2,9265 = 0,0143 < 0,15$ . Беспроблемный набор удовлетворяет критерию точности. Работа алгоритма завершена.

Для определения области существования беспроблемных наборов управляющих опций в рамках данного примера приведем результаты моделирования для следующих наборов управляющих опций (табл. 4).

Обращаем внимание на то, что беспроблемные наборы управляющих опций, приведенные в строках 5, 6, 7 и 13, 14, 15 таблицы 4 являются неприемлемыми, так как для них не выполняется условие приведенного выше критерия точности результатов моделирования. Строка 16 таблицы 4 демонстрирует, что для рассматриваемого примера расчеты с точностью  $10^{-8}$  неприемлемы, по-

скольку при этом не удается обеспечить анализ модели на интервале времени (0...TSTOP) из-за ограничений размера выходного файла файловой системой.

Предлагаемый выше алгоритм может быть улучшен с точки зрения повышения быстродействия за счет следующей процедуры:

**Шаг 1.** Выбирается беспроблемный набор, удовлетворяющий каким-либо требованиям пользователя.

**Шаг 2.** Если по модели или элементам этой модели удается определить минимально допустимые абсолютные значения токов  $I_{min}$ , напряжений  $V_{min}$  и зарядов  $Q_{min}$ , то переход к шагу 3, иначе процедура завершена.

**Шаг 3.** Рассчитываются:  
 $ABSTOL = I_{min} \times RELTOL$   
 $VNTOL = V_{min} \times RELTOL$   
 $CHGTOL = Q_{min} \times RELTOL$

**Шаг 4.** Рассчитанные значения заносятся в таблицу управляющих опций (вкладка OPTIONS модального окна Simulation Settings). Работа процедуры завершена.

#### Пример 2

Для беспроблемного набора управляющих опций, соответствующего строке 3 таблицы 4 продемонстрируем работу процедуры.

**Шаг 1.** ITL4 = 26, RELTOL = 0,0067108.

**Шаг 2.** Для данной схемы (из паспорта на диод):  $I_{min} = 0,3 \times 10^{-6}$  А,  $V_{min} = 0,4$  В,  $Q_{min} = 65 \times 10^{-9}$  Кл.

**Шаг 3.**  
 $ABSTOL = 2,01324 \times 10^{-9}$ ,  
 $VNTOL = 2,68432 \times 10^{-3}$ ,  
 $CHGTOL = 0,436202 \times 10^{-9}$ .

**Шаг 4.** Получен результат:  $T_{JT} = 179,72$ ,  $I_{Dmax} = 2,9386$  А,  $\Delta A = 0,0129$ .

Для рассматриваемого примера сопоставление результатов для случая вычисленных ABSTOL, VNTOL, CHGTOL и этих значений, взятых по умолчанию (табл. 4, строка 3), показывает, что  $T_{JT}$  уменьшилось на 3,14 с, а характеристика точности  $\Delta A$  улучшилась на 0,084 А.

Был проведен эксперимент, направленный на попытку получения результатов лучших по быстродействию и точности по сравнению с приведенными в примере 2 за счет изменения ITL4. Результаты эксперимента приведены в таблице 5.

В первой строке таблицы 5 занесены результаты, соответствующие примеру 2. Из таблицы видно, что при значениях ITL4 = 20, 25, 27 и 30 время  $T_{JT}$  ухудшается в любом случае, а точность  $\Delta A$  незначительно улучшается только для ITL4 = 27.

Был также проведен эксперимент, направленный на попытку получения результатов

**Таблица 5.** Результаты эксперимента по улучшению значений общего времени моделирования и точности за счет изменения параметра ITL4 при постоянном значении RELTOL

№	$h_{max}$	ITL4	RELTOL	$T_{JT}$ , с	$I_{Dmax}$	$\Delta A$
1	$10^{-6}$	26	0,0067108	179,72	2,9386	0,0129
2	$10^{-6}$	20	0,0067108	182,59	2,9396	0,0142
3	$10^{-6}$	25	0,0067108	184,39	2,9429	0,0180
4	$10^{-6}$	27	0,0067108	185,59	2,9380	0,0127
5	$10^{-6}$	30	0,0067108	192,30	2,9380	0,0132

**Таблица 6.** Результаты эксперимента по улучшению значений общего времени моделирования и точности за счет изменения параметров RELTOL, VNTOL, ABSTOL, CHGTOL при постоянном значении параметра ITL4=26

№	$h_{\max}$	RELTOL	ABSTOL	VNTOL	CHGTOL	$T_{\text{IT}}$ , с	$I_{\text{Dmax}}$	$\Delta A$
1	$10^{-6}$	0,0067108	$2,01324 \times 10^{-9}$	$2,68432 \times 10^{-3}$	$0,436202 \times 10^{-9}$	179,72	2,9386	0,0129
2	$10^{-6}$	0,006	$1,8 \times 10^{-9}$	$2,4 \times 10^{-3}$	$0,39 \times 10^{-9}$	188,90	2,9384	0,0139
3	$10^{-6}$	0,007	$2,1 \times 10^{-9}$	$2,8 \times 10^{-3}$	$0,455 \times 10^{-9}$	184,40	2,9354	0,0110

лучших по быстродействию и точности по сравнению с приведенными в примере 2 при ITL4 = 26 за счет изменения RELTOL и, соответственно, ABSTOL, VNTOL и CHGTOL. Результаты эксперимента приведены в таблице 6.

В первой строке таблицы 6 (так же, как и табл. 5) занесен результат, соответствующий примеру 2. Из таблицы видно, что при изменении RELTOL (и, соответственно, ABSTOL, VNTOL и CHGTOL) в окрестности базового варианта время  $T_{\text{IT}}$  ухудшается в любом случае, а точность  $\Delta A$  незначительно улучшается для варианта, приведенного в строке 3.

Таким образом, в рассматриваемом примере можно утверждать, что полученный результат (табл. 5, 6, строка 1) является оптимальным.

Выводы:

- 1) Рекомендации, связанные с определением рациональных наборов управляющих опций, являющихся бесперебойными и обеспечивающих точность получаемых результатов (по критерию пользователя) и быстродействие, — относительны, так как зависят от конкретной моделируемой схемы.
- 2) Предложенный метод определения управляющих опций, задающих параметры численных алгоритмов в OrCAD, позволяет существенно сузить область неустойчивой работы численных алгоритмов системы OrCAD, то есть расширить класс анализируемых моделей.
- 3) Процесс получения бесперебойных наборов управляющих опций становится строго алгоритмизированным.
- 4) Предлагаемый метод позволяет увязать вопрос получения бесперебойных наборов управляющих опций с быстродействием и оценкой точности.
- 5) В предлагаемом методе реализован алгоритм, связывающий относительную погрешность вычисления RELTOL с абсолютными погрешностями ABSTOL, VNTOL и CHGTOL и с параметрами рассматриваемой модели.
- 6) Предлагаемый алгоритм и рассмотрение примеров его реализации позволяют установить следующее:
  - существует бесперебойный набор, обеспечивающий достаточно узкую область устойчивости численных процессов при моделировании. Использование такого бесперебойного набора нежелательно;
  - существует множество бесперебойных наборов, обеспечивающих широкую область устойчивости численных процессов при моделировании. В такой области удастся осуществлять целенаправленный выбор бесперебойных наборов в соответствии с заданным пользователем критерием точности и быстродействия.

Данный алгоритм апробировался на большом количестве аналоговых и аналого-цифровых моделей и в подавляющем большинстве случаев продемонстрировал свою эффективность.

### Литература

1. Taranjit Singh Kukal. Convergence Guide. July 2003. Edited by: Shilpa Sharma. July 2003. P. 715–734.
2. Болотовский Ю. И., Таназлы Г. И. Опыт моделирования систем силовой электроники в среде OrCAD 9.2. Часть 3 // Силовая Электроника. № 2'2005. С. 90–98.
3. PSpice User's Guide, Cadence Design System, Inc. 600 с.
4. Житников В. П., Шерыхалина Н. М., Ураков А. Р. Линейные некорректные задачи. Верификация численных результатов. Уфа: УГАТУ, 2002. 90 с.