

Функциональный блоки для LTspice

Валентин Володин

SPICE симуляторы (в том числе и LTspice) на удивление универсальные программы, о чем многие пользователи даже не догадываются. Например, в LTspice запросто можно имитировать не только электрические и магнитные процессы, но практически все, что можно описать математически. Если, например, нужно промоделировать процесс распределения тепла в печатной плате с несколькими источниками тепла и охладителями, нет проблем. По крайней мере мне не раз удавалось это сделать, избегая необходимости покупки и освоения специализированных программ. И результаты моделирования хорошо совпадали с реальной картиной. Я об этом говорю для того, чтобы пользователи этой прекрасной программы более творчески подходили к её способностям и не упускали возможности использования её в каждом удобно для этого случае.

В последнее время профессионалы и любители силовой электроники всё чаще используют в своих проектах различные цифровые и аналогово-цифровые контроллеры. В этом случае возникает необходимость имитации совместной работы программируемых и аналоговых узлов. Многие в этом месте снисходительно ухмыльнуться, подумав, что автор видимо не в курсе о специализированных программах, позволяющих производить подобное моделирование. Тот же [Proteus](#), например. Нет, про существование подобных программ я в курсе и некоторые из них даже использую в своей профессиональной практике. Но, к сожалению, не все могут позволить себе такой софт для личного пользования. К тому же не всегда требуется детальное моделирование на уровне реального программного кода. Зачастую достаточно функционального моделирования, учитывающего работу реальной микросхемы контроллера. Более того, по мере работы в определенном направлении, пользователь накапливает некие отлаженные программные блоки (модули) из которых очень просто можно компоновать управляющее программное обеспечение для разнообразных нужд. Также производители контроллеров зачастую предлагают пользователям готовые программные модули. В этом случае логично имитировать такие программные модули соответствующими функциональными блоками. Это ускорит процесс моделирования и сделает его более наглядным. А после удачного завершения моделирования, нужно лишь скомпоновать программу в соответствии с полученной функциональной схемой. Получается что-то типа личного функционально-блокового языка высокого уровня. В общем польза от использования функциональных блоков может быть большой. Во многих компьютерных программах, таких как [Matlab-Simulink](#), [PSIM](#) и т. д., функциональные блоки используются достаточно активно. Но ещё за долго до массового использования персональных компьютеров, функциональные блоки прочно обосновались на страницах различной технической литературы, посвящённой автоматическому управлению, электротехнике, радиотехнике и т.п.

Размышляя таким образом, я решил создать специальную библиотеку функциональных модулей для симулятора LTspice.

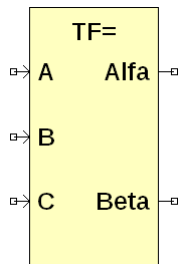
В данный момент набор функциональных блоков ограничен теми задачами, которые решались с его помощью. Но полагаю, что, по мере использования, этот набор будет только увеличиваться. Параллельно формируются некоторые рекомендации, которым этот набор должен соответствовать. Их не много и вот основные из них:

1. Отсутствие земли (узел 0 или GND) в явном виде. В самом деле, где на функциональных схемах вы видели символ земли? Правильно, ни где. Однако, это правило не сильно жесткое. Многие функциональные блоки (модели микросхем, например) могут оказаться достаточно универсальными для того, чтобы их можно было использовать для стандартного SPICE моделирования. К тому же подразумевается, что все сигналы, обрабатываемые и генерируемые функциональными блоками, все равно прикладываются относительно земли. Поэтому, наличие или отсутствие явной земли у функционального блока определяется лишь удобством и наглядностью.
2. Цифровые сигналы, генерируемые функциональными блоками имеют уровни 0 и 1 вольт, соответствующие логически нулю и единице. Это достаточно просто осуществить, т. к. логические элементы LTspice имеют такие уровни по-умолчанию.

Перечень функциональных блоков

Ну вот, сформировав этот небольшой набор рекомендательных правил можно приступить к описанию существующей [библиотеки функциональных блоков для симулятора LTspice](#).

1. Блок **abc-αβ**



Блок **abc-αβ** выполняет преобразование 3-х фазной системы координат **abc** в 2-х фазную **αβ**. В литературе подобное преобразование часто называют преобразованием Кларка.

Блок имеет флаг трансформации **TF**, который может иметь два значения **TF=0** и **TF=1**.

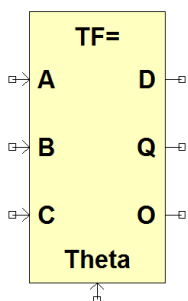
Если используется флаг **TF=0**, то производится амплитудно-инвариантное преобразование (сохраняется амплитудное значение).

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}$$

Если используется флаг **TF=1**, то преобразование производится инвариантно мощности (сохраняется значение мощности).

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}$$

2. Блок **abc-dq0**



Блок **abc-dq0** выполняет преобразование между 3-х фазной системой координат **abc** и вращающейся 2-х фазной системой **dq0**. Для задания вращения служит вход **Theta** (θ), а угол вращения задается в радианах.

В литературе подобное преобразование часто называют преобразованием Парка.

Блок имеет флаг трансформации **TF**, который может иметь два значения **TF=0** (ось **q** опережает ось **d**) и **TF=1** (ось **q** отстает от оси **d**). В зависимости от флага преобразования меняются уравнения преобразования.

Если используется флаг **TF=0**.

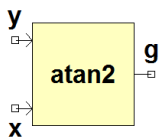
$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_o \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin \theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}$$

Если используется флаг **TF=1**.

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_o \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin \theta & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}$$

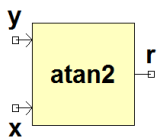
При этом, в любом случае производится амплитудно-инвариантное преобразование. То есть, амплитуда вектора **dq** равна амплитуде синусоидальных трехфазных напряжений.

3. Блок **atan2g** (выход в градусах)



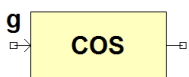
Блок **atan2g** является вычислителем четырехквadrантного арктангенса отношения y/x .

4. Блок **atan2r** (выход в радианах)



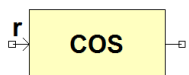
Блок **atan2r** является вычислителем четырехквadrантного арктангенса отношения y/x .

5. Блок **cos** (вход в градусах)



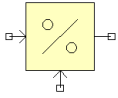
Блок **cos** является вычислителем косинуса.

6. Блок **cosr** (вход в радианах)



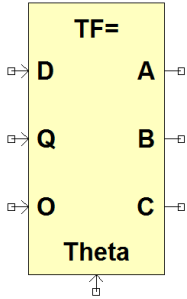
Блок **cosr** является вычислителем косинуса.

7. Блок **div**



Выход блока **div** является результатом деления значения, приведенного к левому входу (делимое), на значение, приведенное к нижнему входу (делитель).

8. Блок **dqo-abc**



Блок **dqo-abc** выполняет преобразование между вращающейся 2-х фазной системой координат **dqo** и 3-х фазной системой **abc**. Для задания вращения служит вход **Theta** (θ), а угол вращения задается в радианах.

Блок имеет флаг трансформации **TF**, который может иметь два значения **TF=0** (ось **q** опережает ось **d**) и **TF=1** (ось **q** отстает от оси **d**). Соответственно, в зависимости от флага преобразования, меняются уравнения преобразования.

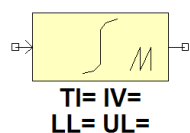
Если используется флаг **TF=0**.

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 1 \\ \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & 1 \\ \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_o \end{bmatrix}$$

Если используется флаг **TF=1**.

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 1 \\ \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & 1 \\ \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_o \end{bmatrix}$$

9. Блок **idt_ir**



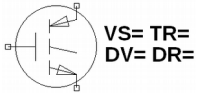
Параметр	Описание
TI	Постоянная времени интегратора, сек.
IV	Начальное состояние интегратора, В.
LL	Нижний предельный уровень, В.
UL	Верхний предельный уровень, В.

Блок **idt_ir** представляет собой интегратор с внутренним сбросом. Т.е. интегратор сбрасывается в 0, если уровень на его выходе достигает верхнего **UL** или нижнего **LL** порогового уровня.

Интегратор имеет следующую передаточную функцию:

$$G(s) = 1 / (s \cdot Ti)$$

10. Блок **igbt**

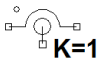


Параметр	Описание
VS	Напряжение насыщения открытого транзистора, В.
TR	Сопротивление открытого транзистора, Ом.
DV	Падение напряжение на антипараллельном диоде, В.
DR	Сопротивление антипараллельного диода, В.

Этот блок представляет собой идеальный **igbt** с антипараллельным диодом. Транзистор открыт, если на его затвор подан уровень 1 вольт и закрыт, если на затвор подан ноль.

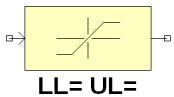
Примечание: Управляющие уровни прикладываются относительно земли, а не относительно эмиттера транзистора.

11. Блок **isen**



Блок **isen** представляет собой изолированный датчик тока. Единственный параметр **K** этого блока определяет его коэффициент передачи. На выходе блока присутствует положительный уровень, если ток втекает в вывод, отмеченный точкой.

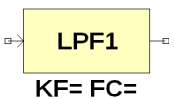
12. Блок **limiter**



Параметр	Описание
LL	Нижний уровень ограничения, В.
UL	Верхний уровень ограничения, В.

Блок имеет единичный коэффициент передачи, но фиксирует выходной сигнал на нижнем **LL** или верхнем **UL** уровне ограничения, если входной сигнал ниже или выше этих уровней.

13. Блок **lpf1**



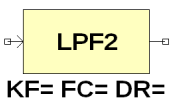
Параметр	Описание
KF	Коэффициент передачи.
FC	Частота среза фильтра, Гц.

Блок **lpf1** представляет из себя фильтр нижних частот первого порядка с передаточной функцией:

$$G(s) = \frac{Kf \cdot \omega_c}{s + \omega_c}$$

где $\omega_c = 2 \cdot \pi \cdot Fc$ - круговая частота среза.

14. Блок **lpf2**



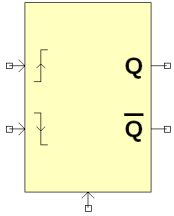
Параметр	Описание
KF	Коэффициент передачи.
FC	Частота среза фильтра, Гц.
DR	Коэффициенты демпфирования .

Блок **lpf2** представляет из себя фильтр нижних частот второго порядка с передаточной функцией:

$$G(s) = \frac{Kf \cdot \omega_c^2}{s^2 + 2 \cdot Dr \cdot \omega_c s + \omega_c^2}$$

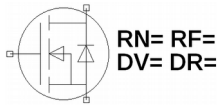
где $\omega_c = 2 \cdot \pi \cdot Fc$ - круговая частота среза.

15. Блок **mono2**



Блок **mono2** представляет из себя одновибратор с настраиваемой шириной генерируемого импульса. Ширина импульса равна напряжению внешнего сигнала, подаваемого на нижний вход блока. В зависимости от задействованных входов одновибратора, его запуск может производиться по фронту и/или срезу входного сигнала.

16. Блок **mosfet**

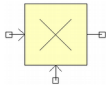


Параметр	Описание
RN	Сопротивление открытого транзистора, Ом.
RF	Сопротивление закрытого транзистора, Ом.
DV	Падение напряжение на антипараллельном диоде, В.
DR	Сопротивление антипараллельного диода, В.

Этот блок представляет собой идеальный **mosfet** с антипараллельным диодом. Транзистор открыт, если на его затвор подан уровень 1 вольт и закрыт, если на затвор подан ноль.

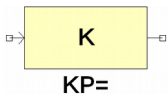
Примечание: Управляющие уровни прикладываются относительно земли, а не относительно истока транзистора.

17. Блок **mult**



Выход блока **mult** является результатом умножения значения, приведенного к левому входу, на значение, приведенное к нижнему входу.

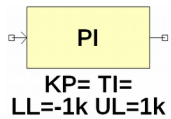
18. Блок **pc**



Блок **pc** позволяет умножать входное значение на некий фиксированный коэффициент **KP**. Этот блок может использоваться в качестве пропорционального регулятора. В этом случае пропорциональный регулятор имеет следующую передаточную функцию:

$$G(s) = Kp$$

19. Блок **pi**

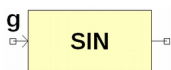


Параметр	Описание
KP	Сопротивление открытого транзистора, Ом.
TI	Сопротивление закрытого транзистора, Ом.
LL	Нижний уровень ограничения, В.
UL	Верхний уровень ограничения, В.

Блок **pi** представляет из себя пропорционально-интегральный регулятор. Выход регулятора можно ограничить снизу и сверху при помощи параметров **LL** и **UL**. Пропорционально-интегральный регулятор имеет следующую передаточную функцию:

$$G(s) = \frac{Kp \cdot (1 + s \cdot Ti)}{s \cdot Ti}$$

20. Блок **sin** (вход в градусах)



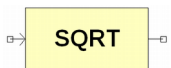
Блок **sin** является вычислителем синуса.

21. Блок **sinr** (вход в радианах)



Блок **sinr** является вычислителем синуса.

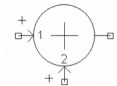
22. Блок **sqrt**



Блок **sqrt** является вычислителем квадратного корня.

23. Блок **sum**

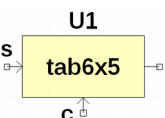
K1=1 K2=1



Параметр	Описание	По-умолчанию
K1	Коэффициент передачи по входу 2.	1
K2	Коэффициент передачи по входу 2.	1

Выход блока **sum** является результатом сложения значений, приведенных к входам 1 и 2 с учетом их коэффициентов передачи.

24. Блок **tab6x5**

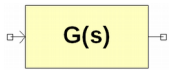


Параметр	Описание
S11...S65	Значения таблицы параметров

Блок **tab6x5** представляет собой таблицу параметров, упакованных в матрицу 6x5 (6 строк и 5 столбцов). Выбор табличного значения осуществляется подачей соответствующих напряжений на входы **s** (строки) и **c** (колонки). Например, для выборки значения расположенного на пересечении 3-й строки и 4-й колонки (S34) необходимо на вход **s** подать 3 вольта, а на вход **c** 4 вольта. Эти напряжения должны быть установлены с точностью не хуже ±0.1 вольт.

Примечание: Если напряжение на входах **s** или **c** выходит из допустимого диапазона, на выходе таблицы продолжает оставаться последнее корректно выбранное значение.

25. Блок **tfcn**



Параметр	Описание
К	Общий коэффициент передачи.
B0...B4	Коэффициенты полинома числителя.
A0...A4	Коэффициенты полинома знаменателя.

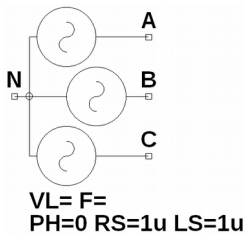
Блок **tfcn** позволяет создать произвольную дробно-рациональную передаточную функцию 4-го порядка (или ниже). Результирующая передаточная функция будет иметь следующий вид:

$$G(s) = K \cdot \frac{B_0 + B_1 s + B_2 s^2 + B_3 s^3 + B_4 s^4}{A_0 + A_1 s + A_2 s^2 + A_3 s^3 + A_4 s^4}$$

Если требуется передаточная функция более низкого порядка, то лишние коэффициенты приравниваются к нулю.

Примечание: По всей видимости текущая реализация преобразования Лапласа в Ltspice (опция Laplace) в основном рассчитана для использования в режиме **AC Analysis**. При попытке использования опции **Laplace** в режиме моделирования **Transient** результат может быть неадекватным. Поэтому при использовании блока **tfcn**, применяющего преобразование Лапласа в явном виде, необходимо убедиться, что этот блок ведёт себя адекватно.

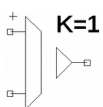
26. Блок **v3f**



Параметр	Описание	По-умолчанию
VL	Действующее линейное напряжение, В.	-
F	Частота, Гц.	-
PH	Общий фазовый сдвиг, градусы.	0
RS	Сопротивление фазы, Ом.	1 мкОм
LS	Индуктивность фазы, Гн.	1 мкГн

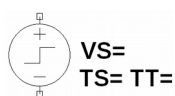
Блок **v3f** представляет из себя источник трехфазного напряжения с нейтральным проводом.

27. Блок **vsen**



Блок **vsen** представляет собой изолированный датчик напряжения. Единственный параметр **К** этого блока определяет его коэффициент передачи. На выходе блока присутствует положительный уровень, если входное напряжение приложена в соответствии с полярностью измерительных входов.

28. Блок **vst**



Параметр	Описание
VS	Высота ступени, В.
TS	Время начала ступени, сек.
TT	Длительность фронта ступени, сек.

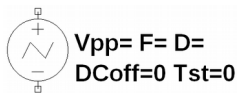
Блок **vst** представляет из себя генератор скачка (ступени) напряжения.

29. Блок **vtm**



Блок **vtm** представляет из себя генератор напряжения пропорционального времени. Единственный параметр **ST** генератора определяет момент его старта. По-умолчанию **ST=0**.

30. Блок **vtr**



Параметр	Описание	По-умолчанию
Vpp	Размах треугольного напряжения (от пика до пика), В.	-
F	Частота, Гц.	-
D	Относительная длительность нарастающей части.	-
DCoff	Смещение нижнего края треугольного напряжения, В.	0
Tst	Время запуска, сек.	0

Блок **vtr** представляет из себя генератор треугольного напряжения.

31. Блок **zoh**



Параметр	Описание	По-умолчанию
TD	Время начала первой выборки, сек.	0
KP	Коэффициенты передачи блока.	1
FS	Частота следования выборок.	-

Блок **zoh** представляет из себя фиксатор нулевого порядка (zero-order hold) или, по-простому, схему выборки-хранения. Этот блок можно использовать для имитации узла АЦП цифрового контроллера.