

Моделирование одноконтных DC/DC-преобразователей в пакете VisSim

Георгий Волович (г. Челябинск)

В статье описаны основные принципы моделирования силовых схем и систем управления одноконтных импульсных DC/DC-преобразователей в пакете VisSim. Приведены блок-схемы моделей понижающих, повышающих и инвертирующих преобразователей с учётом входных и выходных фильтров, а также блок-схемы систем управления.

При разработке импульсных преобразователей со сложной динамикой для источников питания или электропривода необходимо ещё на этапе проектирования иметь возможность прогнозировать их важнейшие свойства, такие как предельные и средние значения напряжений и токов на отдельных элементах и выходе схемы, качество переходных процессов при пуске, коммутации нагрузки, изменении уставки и питающего напряжения. Математические методы анализа могут оказаться либо слишком грубыми, неточными, либо слишком трудоёмкими для инженера-электронщика. Макетирование же отнимает очень много времени, особенно при проектировании мощных устройств. Значительно большей точностью, гибкостью, простотой и наглядностью результатов отличается моделирование динамических систем на компьютерах при помощи специальных моделирующих программ.

Такие пакеты моделирования электронных устройств, как PSpice, MicroCAP и др., детально описыва-

ющие процессы в транзисторах и диодах, полезны для выбора демфирующих цепей и цепей управления силовыми ключами, хотя в них и не учитывается влияние топологии печатных плат. Однако при выборе и отладке систем управления преобразователями подобная детализация становится излишней, напрасно занимая вычислительные ресурсы компьютера. Простая в применении программа Electronic Workbench удобна для использования преимущественно в учебных целях.

Моделирование процессов в сложных динамических системах на компьютерах в настоящее время используется очень широко. Для этого применяются пакеты программ моделирования VisSim, Simulink, SistemView и др. Наибольшей популярностью у инженеров пользуется VisSim фирмы Visual Solutions, благодаря доступности (версия 3.0 рассылается бесплатно), простоте применения и удобному интерфейсу. VisSim интегрируется с массовыми системами компьютерной математики Mathcad и MATLAB и превосходит другие системы моделирования по скорости.

МОДЕЛИРОВАНИЕ В VISIM ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Описание пакета VisSim и основные правила работы в нём приведены в [1, 2]. Его главная особенность – построение структурных схем из блоков (однонаправленных графов), имеющих различное функци-

ональное назначение. Рассмотрим пример моделирования в пакете VisSim простейшей электрической цепи (см. рис. 1). Процессы в этой цепи описываются следующей системой уравнений в операторной форме:

$$\begin{aligned} U &= E_T - IR_T, \\ U_C &= U - IsL \text{ или } I = \frac{1}{sL}(U - U_C), \\ I_H &= \frac{U_C}{R_H}, \\ I_C &= I - I_H, \\ U_C &= \frac{1}{sC}I_C. \end{aligned} \tag{1}$$

Используя блоки генерации постоянного сигнала, суммирования, интегрирования и усиления, построим на основании системы (1) схему моделирования в пакете VisSim (см. рис. 2).

В пакете VisSim можно легко создать пользовательские блоки моделей отдельных элементов. Рассмотрим, например, реальную катушку, обладающую, помимо индуктивности L , ещё и сопротивлением постоянному току R (см. рис. 3а). Напряжение и ток в катушке связаны операторным уравнением:

$$U = IsL + IR \text{ или } I = (U - IR) \frac{1}{Ls}.$$

Этому уравнению соответствует схема моделирования, представленная на рисунке 3б. Часть схемы, расположенную между блоками переменных «variable» U_L и I_L , преобразуем в субблок, который назовём Y_L , т.к. его передаточная функция имеет размерность проводимости. Этот блок изображён на рисунке 3в. Для него справедливо:

$$I = Y_L \cdot U.$$

Конденсатору с учётом эквивалентного последовательного сопротивле-

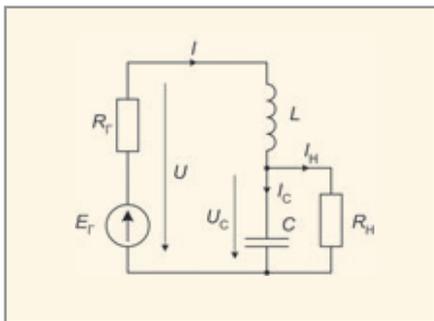


Рис. 1. Схема электрической цепи

ния $R_{ЭП}$ (см. рис. 4а) соответствует уравнение:

$$U = IR_{ЭП} + I \frac{1}{C} \frac{1}{s}$$

Модель конденсатора в пакете VisSim приведена на рисунке 4б. Эту модель также можно преобразовать в субблок (см. рис. 4в), который обозначим ZC, т.к. его передаточная функция имеет размерность сопротивления.

Модели силовых ключей

Основными ключевыми элементами в импульсных преобразователях являются транзисторы и диоды. Рассмотрим моделирование диода. В VisSim возможно точное воспроизведение вольт-амперной характеристики (ВАХ) диода в соответствии с уравнением Эберса-Молла, поскольку здесь есть экспоненциальный блок. Однако достаточную точность для анализа динамических характеристик преобразователей даёт упрощённая модель, отображающая ВАХ, представленную на рисунке 5а. В этом случае статическая характеристика диода описывается уравнением:

$$U = \begin{cases} U_{ПОР} + IR_{ПР}, & I > 0 \\ IR_{ОБР}, & I < 0 \end{cases}$$

где $R_{ПР}$ – прямое сопротивление диода (обычно доли ома), $R_{ОБР}$ – обратное сопротивление диода (обычно мегаомы), U – пороговое напряжение (примерно 0,7 В), которое в простейших случаях можно не учитывать. Схема моделирования этой зависимости представлена на рисунке 5б.

При моделировании силового ключа следует учитывать, что он коммутирует не только напряжение, но и ток. Во многих типах преобразователей силовой ключ S1 и диод имеют соединение (см. рис. 6а), в котором вместо диода (или параллельно ему) может включаться противофазный ключ S2 (так называемый синхронный выпрямитель). В этом случае структурно ключ может быть представлен двумя блоками перемножения (см. рис. 6б). Буквой ρ обозначена булева функция, называемая коммутационной, такая, что:

$$\rho(t, \gamma) = \begin{cases} 1, & nT < t \leq (n+\gamma)T; \\ 0, & (n+\gamma)T < t < (n+1)T; \end{cases} \quad n=0,1,2,\dots \quad (2)$$

где γ – относительная длительность замкнутого состояния ключа, форми-

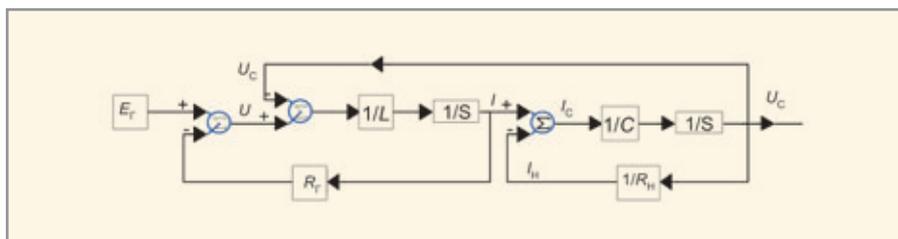


Рис. 2. Модель в VisSim электрической цепи, приведённой на рисунке 1

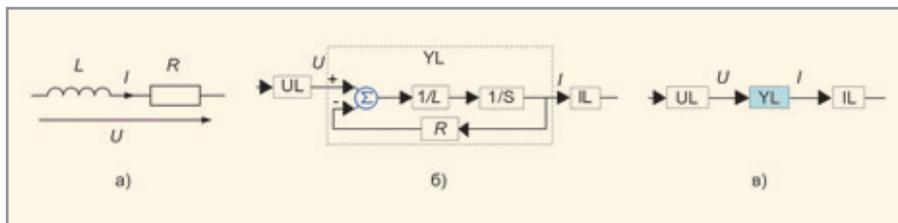


Рис. 3. Модель катушки индуктивности

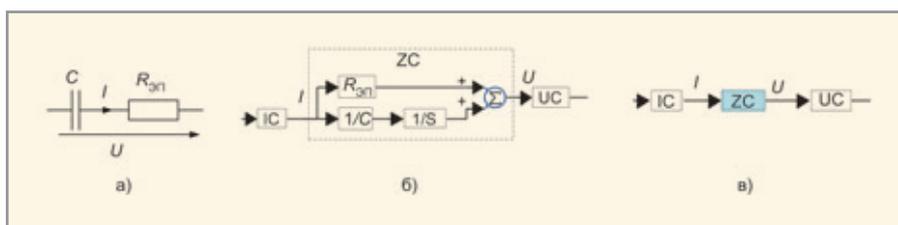


Рис. 4. Модель конденсатора

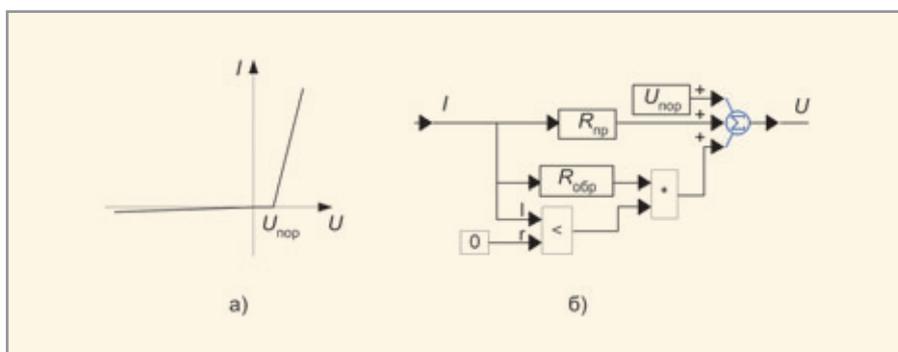


Рис. 5. Моделирование диода

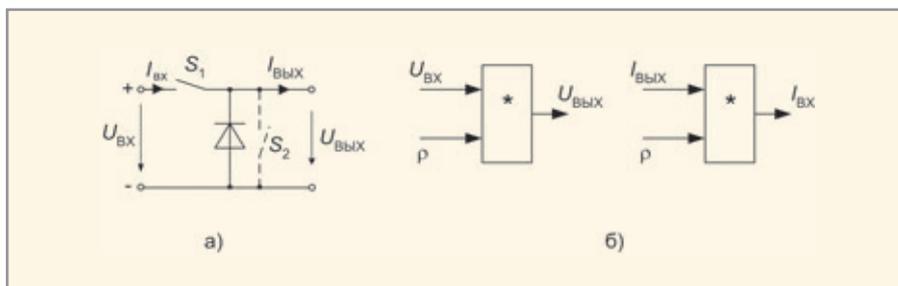


Рис. 6. Модель силового ключа

руемого широтно-импульсным модулятором; T – период следования импульсов.

МОДЕЛИРОВАНИЕ В VisSim Понижающих импульсных преобразователей

Схема простейшего понижающего преобразователя приведена на рисунке 7. Процессы в схеме

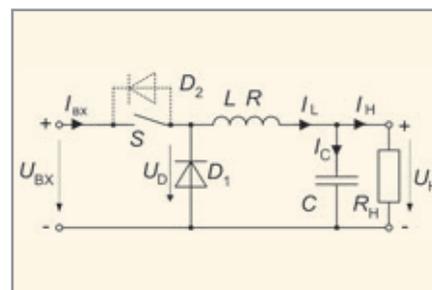


Рис. 7. Схема понижающего преобразователя

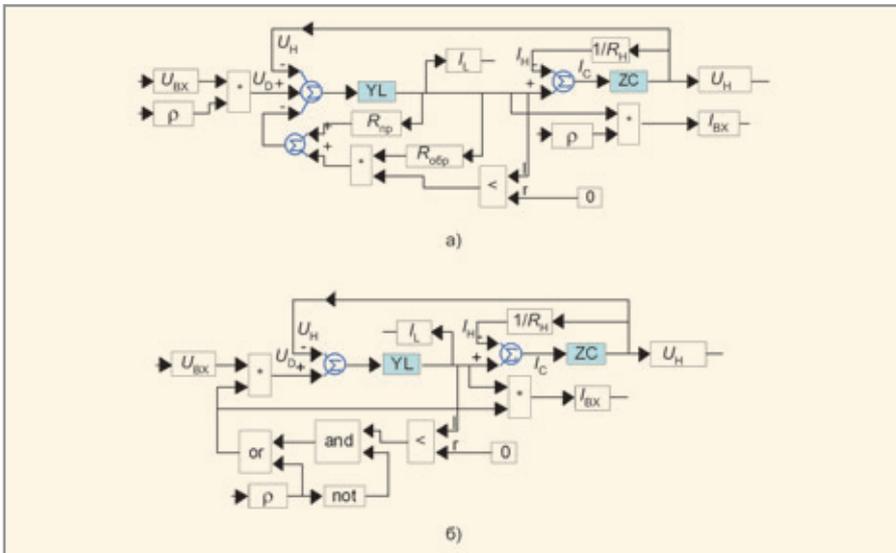


Рис. 8. Модель понижающего преобразователя

описываются системой уравнений:

$$U_D = \begin{cases} U_{BX}\rho, & I_L > 0 \\ U_H, & I_L \leq 0 \end{cases}, \quad (3)$$

$$U_D = I_L(sL + R) + U_H, \quad (4)$$

$$I_C = I_L - I_H, \quad (5)$$

$$I_H = U_H/R_H, \quad (6)$$

$$U_H = I_C/sC, \quad (7)$$

$$I_{BX} = \rho I_L. \quad (8)$$

Этой системе соответствует схема моделирования, представленная на рисунке 8. Здесь блоки с обозначением U_{BX} , I_{BX} , ρ и др. – это блоки переменных, с помощью которых может быть осуществлена связь с другими частями схемы, например, со входным фильтром и системой управления. При использовании вместо диода в схеме на рисунке 7 синхронного выпрямителя модель диода (рис. 5) не нужна, т.е. блоки умножения, сравне-

ния, $R_{пр}$, $R_{обр}$, а также сумматор следует исключить.

В настоящее время в качестве ключа в составе импульсных преобразователей наиболее часто используются МОП-транзисторы с вертикальной структурой. Эти транзисторы имеют паразитный диод между подложкой и стоком, показанный на рисунке 7 пунктиром (D2). Наличие этого диода заметно влияет на процессы в преобразователе, поскольку ключ S проводит ток в обратном направлении даже в закрытом состоянии. В этом случае напряжение на диоде D1 и ток через ключ (уравнения (3) и (8) соответственно) будут определяться другими выражениями:

$$U_D = U_{BX}[\bar{\rho} \cap (I_L < 0) \cup \rho], \\ I_{BX} = I_L[\bar{\rho} \cap (I_L < 0) \cup \rho],$$

где $\rho = 1 - \gamma$ – инверсия коммутационной функции (2). Вариант модели

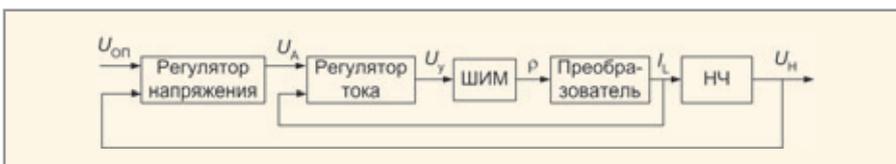


Рис. 11. Блок-схема преобразователя с дополнительной обратной связью по току ШИМ – широтно-импульсный модулятор, НЧ – непрерывная часть, включающая выходной фильтр и нагрузку

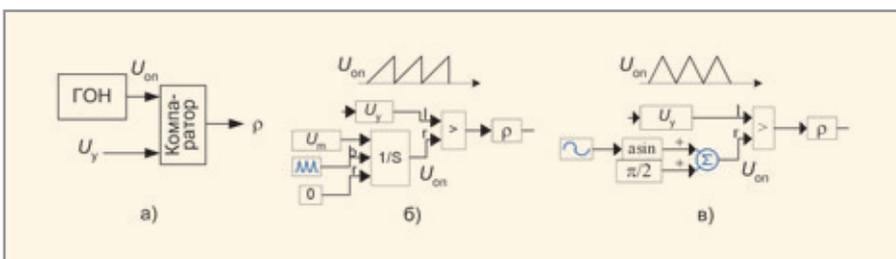


Рис. 12. Моделирование ШИМ

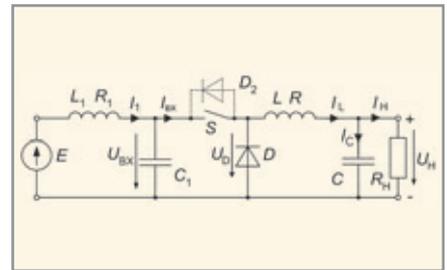


Рис. 9. Схема силовой части понижающего преобразователя со входным фильтром

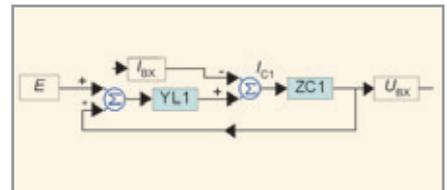


Рис. 10. Модель входного фильтра

преобразователя с учётом диода D2 приведён на рисунке 8б.

Наличие блока коммутации входного тока позволяет легко ввести в модель преобразователя входной фильтр. Схема силовой части понижающего преобразователя со входным фильтром показана на рисунке 9.

Используя блоки переменных «variable», можно дополнить модели преобразователя (рис. 8) подсистемой входного фильтра, схема моделирования которого приведена на рисунке 10.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ

Поскольку VisSim создан для моделирования в первую очередь систем автоматического управления, в нём легко реализуются практически любые линейные и нелинейные регуляторы. В настоящее время в импульсных преобразователях постоянного тока для источников питания и электропривода наиболее широко используются регуляторы с дополнительной обратной связью по току дросселя [3, 4]. Блок-схема преобразователя с такой связью представлена на рисунке 11.

Регуляторы напряжения и тока легко могут моделироваться в пакете VisSim блоками передаточных функций «transferFunction». При необходимости учёта насыщения усилителей этих регуляторов могут использоваться также блоки ограничения «limit». Широтно-импульсный модулятор (ШИМ) обычно включает генератор опорного напряжения (ГОН) и компаратор (см. рис. 12а).

Чаще других используется опорное напряжение пилообразной формы (односторонняя ШИМ второго рода) или симметричной треугольной (двухсторонняя ШИМ второго рода). На рисунке 12б представлена реализация в пакете VisSim ШИМ с пилообразным опорным напряжением. Здесь, помимо уже применявшихся блоков, используется интегратор со сбросом и генератор импульсов. Частота импульсов ШИМ определяется частотой генератора импульсов, а амплитуда опорного напряжения вычисляется по формуле:

$$U_{оп} = U_m/f,$$

где f – частота импульсов ШИМ, Гц. Модель ШИМ с симметричным треугольным опорным напряжением приведена на рисунке 12в. Частота задаётся генератором синусоиды. Блок «asin» преобразует эту синусоиду в колебания треугольной формы, с частотой синусоиды и амплитудой в $\pi/2$ больше амплитуды синусоиды.

Пример. На рисунке 13 приведена схема моделирования понижающего импульсного преобразователя со входным фильтром, схема силовой части которого представлена на рис. 9. Параметры преобразователя: $E = 12$ В, $U_H = 5$ В, $L = L_1 = 5$ мкГн, $R = 0,01$ Ом, $R_1 = 0,02$ Ом, $C = 2000$ мкФ, $C_1 = 1000$ мкФ, номинальный ток нагрузки – 40 А, частота коммутации ключа – 200 кГц. Шаг интегрирования выбран равным 50 нс. Метод интегрирования и другие параметры – те, что используются в пакете VisSim по умолчанию. Верхний блок схемы представляет собой основную часть преобразователя с ключом, имеющим встречно-параллельный диод, средний блок – входной фильтр с первичным источником энергии, нижний блок – систему управления, включающую дополнительную связь по току дросселя L. Регулятор тока (РТ) представляет собой безынерционное звено с коэффициентом передачи 0,1 (коэффициент передачи датчика тока предполагается равным 1 В/А). Регулятор напряжения – пропорционально-интегральный (ПИ) с передаточной функцией:

$$W_{ПИ}(s) = \frac{1+s \times 5 \times 10^{-5}}{s \times 2 \times 10^{-7}}.$$

На рисунке 14 представлены временные диаграммы переходных процессов

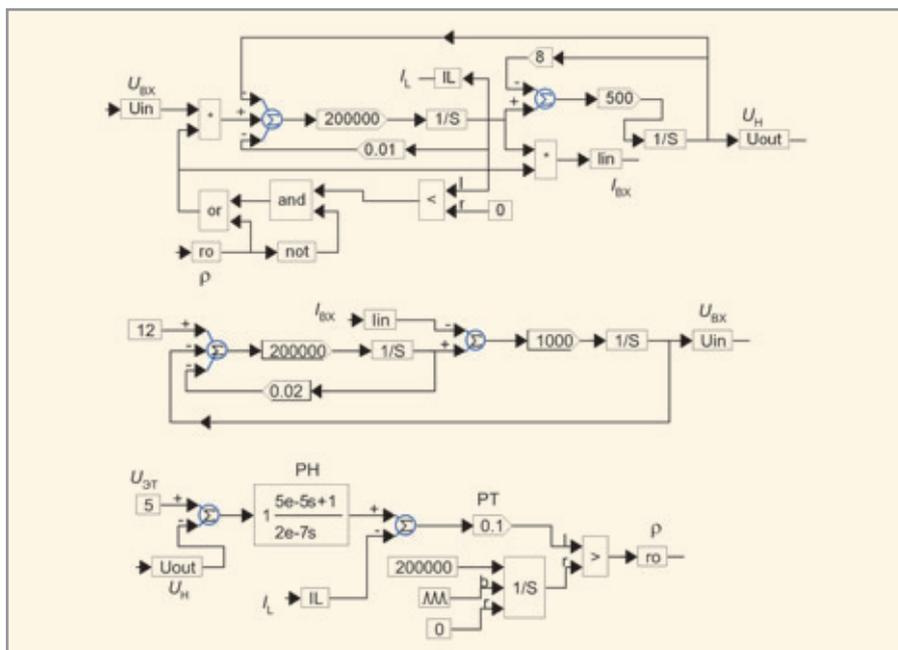


Рис. 13. Схема моделирования из примера

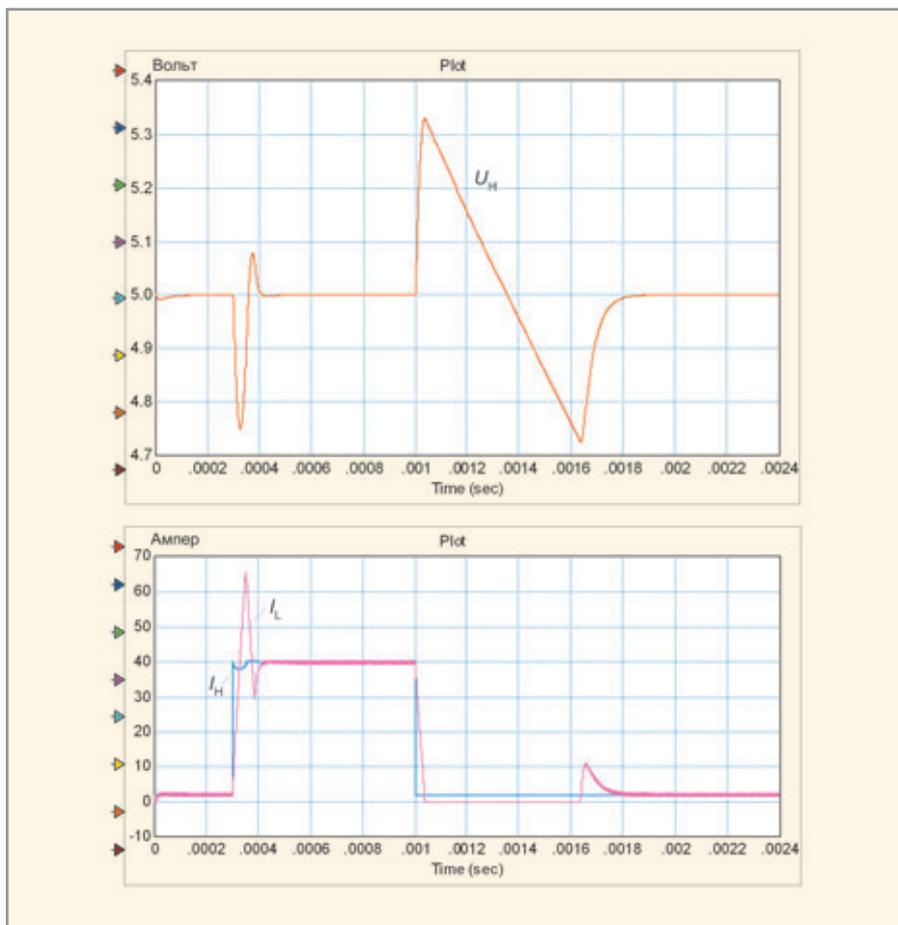


Рис. 14. Временные диаграммы переходных процессов в модели

процессов в модели, возникающие при скачкообразном увеличении нагрузки от 2 до 40 А в момент $t_1 = 0,3$ мс и уменьшении от 40 до 2 А в момент $t_2 = 1$ мс. Ясно виден временный переход в режим нулевого тока дросселя после сброса нагрузки.

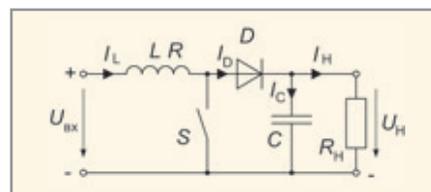


Рис. 15. Схема силовой части повышающего преобразователя

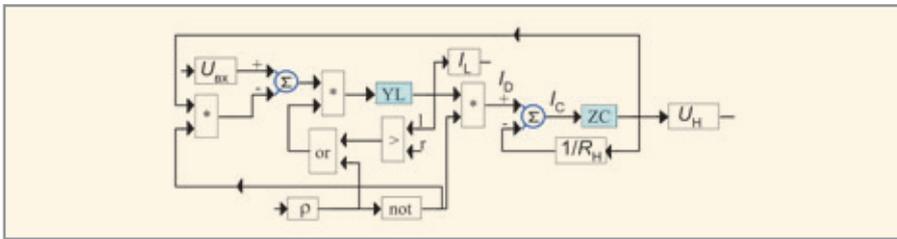


Рис. 16. Модель силовой части повышающего преобразователя

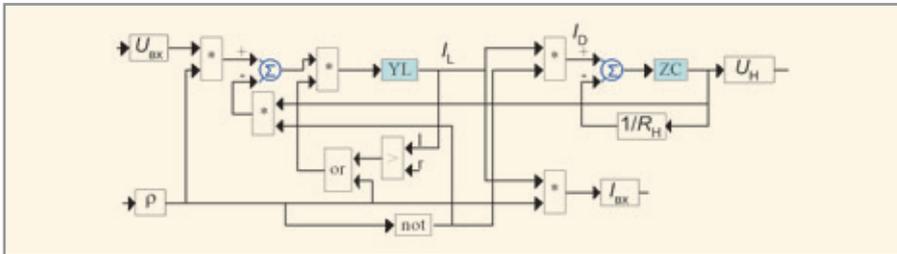


Рис. 18. Модель силовой части инвертирующего преобразователя

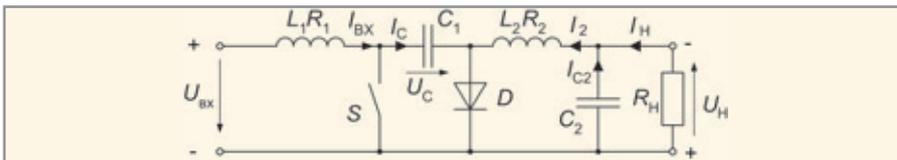


Рис. 19. Схема силовой части преобразователя Кука

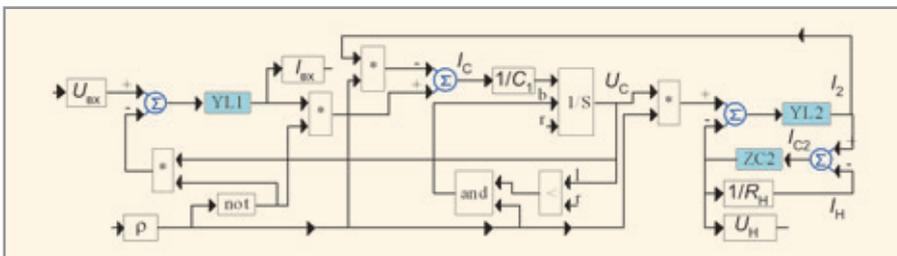


Рис. 20. Модель силовой части преобразователя Кука

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЫШАЮЩЕГО ИМПУЛЬСНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Основная схема силовой части повышающего преобразователя приведена на рисунке 15. Для этой схемы справедливы уравнения:

$$\begin{aligned} U_{BX} &= I_L(sL + R) + \bar{\rho}U_H, \\ I_D &= I_C + I_H, \\ I_D &= \bar{\rho}I_L, \quad I_L > 0, \\ &0, \quad I_L \leq 0, \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} U_H &= I_C/sC, \\ I_H &= U_H/R_H. \end{aligned}$$

Этой системе соответствует модель, показанная на рисунке 16. Эта модель может быть дополнена системой управления, аналогичной нижнему блоку на рис. 13, входным фильтром, аналогичным среднему блоку на рис. 13, и выходным фильтром, аналогичным показанному на рис. 2.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНВЕРТИРУЮЩЕГО ИМПУЛЬСНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Схема силовой части инвертирующего преобразователя приведена на рисунке 17. С учётом принципа действия этой схемы для неё справедливы следующие соотношения:

$$\begin{aligned} I_L(sL + R) &= \rho U_{BX} + \bar{\rho}U_H, \\ I_D &= I_C + I_H, \\ I_D &= \bar{\rho}I_L, \quad I_L > 0, \\ &0, \quad I_L \leq 0, \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} U_H &= I_C/sC, \\ I_H &= U_H/R_H, \\ I_{BX} &= \rho I_L. \end{aligned}$$

Модель силовой части инвертирующего преобразователя показана на рисунке 18. Как и в предыдущем случае, она может быть дополнена моделями системы управления, а также входным и выходным фильтрами.

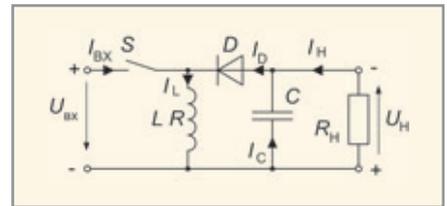


Рис. 17. Схема силовой части инвертирующего преобразователя

Напряжение на выходе модели, в отличие от реального преобразователя, имеет ту же полярность, что и у источника входного напряжения. При необходимости полярность можно изменить аналоговым инвертором (блок «-x»).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ КУКА

Преобразователь Кука относится к однотактным составным DC/DC-преобразователям [5]. Он имеет такую же регулировочную характеристику, как и инвертирующий преобразователь, но при необходимости сглаживания входного тока и получения малых пульсаций выходного напряжения содержит меньше силовых LC-элементов. Поэтому в последнее время его популярность растёт, и уже выпускаются интегральные микросхемы таких преобразователей (например, LT1611). Схема силовой части преобразователя Кука приведена на рисунке 19.

Процессы в схеме описываются следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned} U_{BX} &= I_{BX}(sL_1 + R_1) + \bar{\rho}U_C, \\ \rho U_C &= I_2(sL_2 + R_2) + U_H, \\ I_C &= \bar{\rho}I_{BX} + \rho I_2, \\ U_H &= I_C/sC_2, \\ I_2 &= I_C + I_H, \\ U_C &= I_C/sC_1, \\ I_H &= U_H/R_H. \end{aligned} \quad (11)$$

Модель силовой части преобразователя Кука представлена на рисунке 20. Напряжение на конденсаторе C1 при замкнутом силовом ключе S может быть только положительным (иначе он разрядится через диод). В стационарных условиях это напряжение всегда положительно, но в переходных режимах (например, при снижении уставки выходного напряжения скачком) это напряжение при разомкнутом ключе может быть отрицательно. Для воспроизведения этой ситуации в схеме моделирования используется блок интегратора

со сбросом. Логика управления сбросом этого блока следующая:

$$b = (U_C < 0) \wedge \bar{p}.$$

Эта модель также дополняется моделью системы управления.

МОДЕЛИРОВАНИЕ SEPIC-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

SEPIC-преобразователь [5] так же, как инвертирующий преобразователь и схема Кука, способен как повышать, так и понижать напряжение первичного источника, но в отличие от первых, полярность его выходного напряжения относительно общего провода совпадает с полярностью первичного источника. SEPIC-преобразователь является наилучшим вариантом стабилизированного DC/DC-преобразователя в случае, если первичное (входное) напряжение может принимать значения как большие, так и меньшие номинального выходного.

Дополнительное достоинство этой схемы заключается в том, что входная цепь отделена по постоянному току от нагрузки конденсатором. Это защищает нагрузку от перенапряжения при пробое ключа или выходе из строя системы управления. Схема силовой части SEPIC-преобразователя приведена на рисунке 21. Для этой схемы имеют место уравнения:

$$I_{BX} = I_{BX}(sL_1 + R_1) + \bar{p}U_C - I_2(sL_2 + R_2), \quad (12)$$

$$pU_C - \bar{p}U_H = I_2(sL_2 + R_2), \quad (13)$$

$$I_C = \bar{p}I_{BX} + pI_2, \quad (14)$$

$$I_D = [\bar{p} \wedge (I_C > I_2)](I_C + I_2), \quad (15)$$

$$U_C = I_C / sC_1, \quad (16)$$

$$U_H = I_C / sC_2, \quad (17)$$

$$I_H = U_H / R_H. \quad (18)$$

Уравнение (15) отражает тот факт, что диод проводит ток, если только

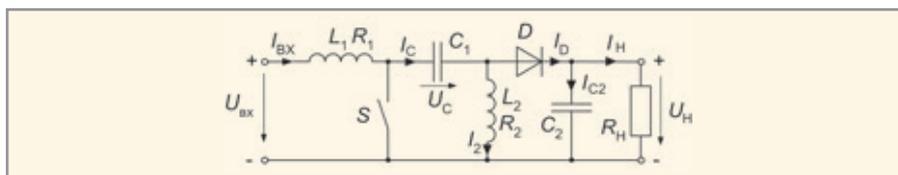


Рис. 21. Схема силовой части SEPIC-преобразователя

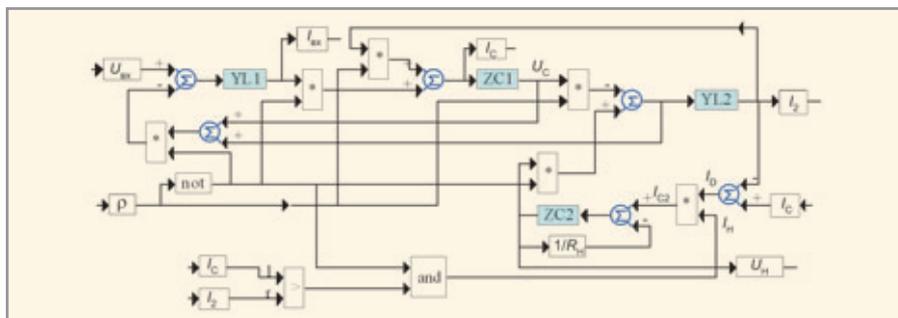


Рис. 22. Модель силовой части SEPIC-преобразователя

при разомкнутом ключе выполняется условие:

$$I_C > I_2.$$

Модель в VisSim, соответствующая системе уравнений (12)...(14), представлена на рисунке 22.

В заключение несколько примечаний и рекомендаций.

Шаг интегрирования должен быть выбран не более 0,01 от периода тактового генератора ШИМ и кратен ему.

После окончания процесса моделирования необходимо посмотреть сигнал на выходе ШИМ. Если при моделировании системы с обратной связью за период тактового генератора сигнал на выходе ШИМ с(t) совершает более одного колебания – это признак неустойчивости системы (обычно токового контура). Необходимо снизить усиление токового контура в области высоких частот.

Модели в VisSim не учитывают влияния на вход широтно-импульс-

ного модулятора коротких импульсов («пичков»), обусловленных переходными процессами в паразитных элементах и связях преобразователей.

Блоки задания нуля «const» на входах блоков сравнения, интегратора со сбросом и др. можно не подключать.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дьяконов В.П. VisSim+Mathcad+MATLAB. Визуальное математическое моделирование. М.: СОЛОН-Пресс, 2004.
2. Клиначёв Н.В. Моделирование систем в программе VisSim. Справочная система. <http://vissim.nm.ru/help/vissim.htm>.
3. Гудинаф Ф. Интегральные схемы управления импульсными источниками питания. Электроника. 1989. № 23. С. 62–74.
4. Волович Г.И. Устойчивость импульсных стабилизаторов напряжения. Схемотехника. 2001. № 12. С. 16–20; 2002. № 1. С. 32–35.
5. Волович Г.И. Составные DC/DC преобразователи. Схемотехника 2002 № 6. С. 10–11.



Вторичные источники питания

www.platan.ru ПЛАТАН

надежность ♦ эффективность ♦ универсальность

Изолированные и неизолированные
DC-DC КОНВЕРТЕРЫ

Количество выходов: от одного до трех
Входное напряжение: 3,3 – 72 В
Выходное напряжение: 3,3, 5, 9, 12, 15 В
Мощность: 3, 5, 8, 10, 20 Вт
КПД: до 86%
Корпуса DIP, SIP, поверхностный монтаж и пайка в отверстия

Москва, ул. Ивана Франко, д. 40, стр. 2
Тел./факс: (095) 73-75-999
Почта: 121351, Москва, а/я 100
E-mail: platan@aha.ru