

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КЛЮЧАХ УСТРОЙСТВ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ В СРЕДЕ MATLAB/SIMULINK

Замаруев В.В., Ивахно В.В..

*Национальный технический университет "ХПИ", Харьков, Украина,
e-mail: vvz@kpi.kharkov.ua*

Оценка потерь мощности в силовых полупроводниковых ключах полупроводниковых преобразователей электроэнергии на этапе проектирования преобразовательных систем является неотъемлемой частью процесса конструирования таких систем. Потери мощности в ключах являются одним из важных показателей эффективности преобразовательных систем, который влияет на к.п.д. системы, габариты и стоимость систем охлаждения ключей, надежность их работы, определяемую температурой полупроводниковых кристаллов (переходов).

Потери мощности состоят из статических потерь, вызванных током, протекающим через ключ во включенном состоянии, а также потерь, возникающих на интервалах переключения ключа из выключенного состояния во включенное (динамические потери включения) и наоборот (динамические потери выключения). Определение составляющих потерь позволяет оптимизировать соответствующие составляющие преобразователя – изменять алгоритмы управления и схемные решения, использовать другие полупроводниковые приборы и т.д.

В настоящее время разработаны мощные системы моделирования электронных, в том числе, преобразовательных, систем, позволяющие решать большое число разнообразных задач, в том числе:

- моделирование смешанных аналогово-цифровых устройств;
- поведенческое моделирование на уровне структурных схем.

Исследование электромагнитных процессов в схемах преобразователей электрической энергии относится к задачам первой группы (моделирование смешанных аналогово-цифровых устройств). Моделирование систем управления преобразователями и поведения преобразователей совместно с системами управления – ко второй.

При моделировании применимы различные степени детализации (приближения) моделей компонентов к характеристикам реальных компонентов. В этом смысле можно выделить, по крайней мере, два уровня приближения: верхний – менее детальный, и нижний – более детальный.

На верхнем уровне, достаточном для понимания основных процессов в системе, достаточно представлять основной силовой компонент преобразователя – электронный СПК – идеальным ключом. Идеальный ключ мгновенно переключается из одного состояния в другое. Во включенном состоянии сопротивление ключа и падение напряжения на нем пренебрежимо малы. В выключенном состоянии сопротивление ключа существенно выше сопротивлений других компонентов. Весьма важным условием для применения такой модели является соотношение между временными интервалами переключения реального ключа и длительностью временных интервалов протекания тока через ключ. Если длительность процесса переключения существенно

меньше длительности нахождения ключа под токовой нагрузкой, то представление ключа идеальным является допустимым.

Для решения подобных задач моделирования преобразовательных систем в настоящее время общепринятым программным обеспечением является среда программирования MATLAB.

Для разработчиков в области преобразовательной техники особый интерес представляет также пакет Simulink с библиотекой блоков SimPowerSystems, которая содержит набор блоков для имитационного моделирования электротехнических устройств. Силовые полупроводниковые ключи моделируются либо как идеальные ключи, либо применяются простейшие модели вольт-амперных характеристик стандартных типов ключей - диодов, полевых транзисторов с изолированным затвором (MOSFET), биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT), тиристоров (SCR), запираемых тиристоров (GTO). Переключение ключей при таком моделировании предполагается мгновенным, т.е. нет возможности произвести оценку динамических потерь.

Для моделирования преобразовательной системы на более детальном уровне в настоящее время общепринятым является программный комплекс PSPICE A/D, входящий в состав OrCAD [1]. Данный программный продукт использует более сложные модели силовых компонентов и позволяет получать адекватные осциллограммы процессов в силовых ключах, в том числе и на интервалах переключения, с учетом влияния паразитных параметров компонентов и т.д.

Существенной особенностью PSPICE (и функциональностью, не доступной MATLAB) является значительно более высокая степень детализации характеристик моделей силовых полупроводниковых ключей. Так, полная модель такого прибора, как MOSFET, может включать в себя более 50 различных физических параметров [1]. В упрощенных версиях моделей могут отсутствовать большое число параметров (обычно число используемых параметров в этом случае не превышает 15), что существенно снижает точность результатов моделирования по отношению к реальным процессам. Часть параметров модели может быть уточнена путем сопоставления данных моделирования и экспериментальных данных [1, 2, 3].

Большинство разработчиков полупроводниковых приборов предоставляют SPICE модели IGBT, MOSFET и других ключей. Новые транзисторы с улучшенными характеристиками выпускаются постоянно, а создание модели – долгий и кропотливый процесс, требующих к тому же немалых финансовых затрат. Поэтому модели новейших приборов появляются спустя довольно продолжительное время после их выпуска [4].

Помимо PSPICE и подобных программных продуктов имитационного моделирования, решать задачу оценки коммутационных потерь в силовых ключах позволяют также специализированные не имитационные программы ведущих производителей силовых полупроводниковых приборов – Mitsubishi, Infineon, Semikron – программные продукты Melcosim, Iposim и Semisel соответственно.

Среди особенностей программ следует отметить, что они, в отличие от MATLAB, не основаны на решении систем дифференциальных уравнений. Программы имеют ограниченный (хотя и довольно обширный) набор стандартных доступных для анализа силовых схем со стандартными алгоритмами управления силовыми ключами. Для оценки потерь мощности и температуры перехода в Semisel [5], в предположении об идеальности прибора как ключа, по стандартным выражениям для выбранного типа преобразователя производится вычисление средних I_{AV} и действующих I_{RMS} токов силового ключа. Затем, с использованием стандартной модели включенного ключа как двухполюсника (последовательное соединение источника Э.Д.С. с известной

величиной порогового напряжения $U_{(TO)}$ и резистора с известной величиной дифференциального сопротивления r_T) производится вычисление средней мощности статических потерь P_{st} :

$$P_{st} = I_{AV} \cdot U_{(TO)} + I_{RMS}^2 \cdot r_T \quad (1)$$

Динамические потери определяются на основании известной связи между энергией коммутационных потерь конкретного типа прибора и параметрами коммутационного процесса – коммутируемых токов и напряжений ключа. Зависимости между величинами энергий коммутации и величинами коммутируемых токов и напряжений приводятся в справочных данных на прибор выбранного типа. В качестве примера на рис. 1 приведены зависимости для IGBT силового модуля типа SK60GAR123 производства Semikron с номинальным коммутируемым током I_{Cnom} 50 А, номинальным коммутируемым напряжением V_{CCnom} 600 В и предельным напряжением 1200 В [6].

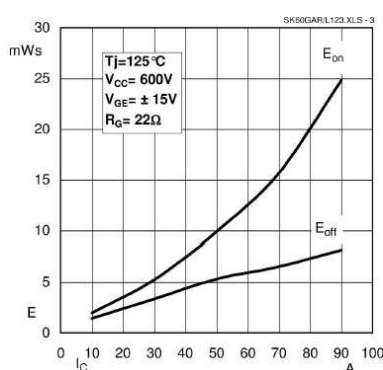


Рис. 1. График зависимости энергии коммутационных потерь для прибора типа SK60GAR123.

Из графиков рис. 1 видно, что в диапазоне коммутируемых токов, не превышающих величину номинального тока прибора, эти зависимости практически линейные, что позволяет аппроксимировать зависимость между величиной соответствующей энергии при произвольном коммутируемом токе (токе коллектора) I_C и величиной энергии при номинальном коммутируемом токе I_{Cnom} [7]:

$$E_{on}(I_C) = E_{on}(I_{Cnom}) \cdot \left(\frac{I_C}{I_{Cnom}} \right) \cdot \left(\frac{V_{CC}}{V_{CCnom}} \right)^{K_V},$$

$$E_{off}(I_C) = E_{off}(I_{Cnom}) \cdot \left(\frac{I_C}{I_{Cnom}} \right) \cdot \left(\frac{V_{CC}}{V_{CCnom}} \right)^{K_V}, \quad (2)$$

где V_{CC} , V_{CCnom} , K_V – фактическое и номинальное значение величины коммутируемого напряжения и коэффициент, учитывающий возможное их отличие;

$E_{on}(I_{Cnom})$, $E_{off}(I_{Cnom})$ – величины энергий включения и выключения транзисторов при номинальном коммутируемом токе (указываются в справочных данных для рабочей температуры, рекомендуемого импеданса драйвера и номинального коммутируемого напряжения).

В типовых случаях величина коммутируемого напряжения и номинального напряжения совпадают ($V_{CC} = V_{CCnom} = 600$ В для IGBT с предельным напряжением 1200 В). Типовое значение коэффициента K_V для 1200В IGBT производства Semikron составляет 1,4, для 1700В IGBT – 1,35.

При полученной из выражений (2) величине энергии коммутации определяется величина средней мощности коммутационных потерь за период преобразования:

$$P_{sw} = (E_{on} + E_{off}) \cdot f, \quad (3)$$

где f – частота переключений.

Выражение (3) справедливо в случае постоянства величин коммутируемых токов и коммутируемых напряжений, в противном случае следует проинтегрировать величины энергии потерь за период повторяемости.

Суммарные потери в ключе определяются статическими потерями P_{st} из (1) и динамическими P_{sd} из (3).

Параметры силовых приборов, определяющие величины соответствующих потерь (пороговые напряжения включенных ключей и их дифференциальные сопротивления, коэффициенты, связывающие величины энергии коммутации с величинами коммутационных токов и напряжений и т.п.) заложены в базу данных программы и автоматически определены при выборе типа прибора. При оценке потерь предполагается, что в преобразователе установлены идеальные силовые фильтры и, следовательно, коммутируемые IGBT токи при включении и выключении равны.

Поскольку Semisel не является имитационной программой, пользователь лишен возможности наблюдать осциллограммы токов и напряжений силовых ключей, учитывать реальные параметры силовых фильтров, использовать собственные алгоритмы управления и схемные решения.

Комплекс MatLab обладает ограниченным инструментарием для детального моделирования полупроводниковых ключей. Для преодоления ограничений, связанных с характером моделей, разработан интерфейс PSPICE SLPS, являющийся инструментом связи между моделирующим ядром программы MATLAB/Simulink фирмы MathWorks и ядром схемотехнического моделирования PSPICE A/D. Интерфейс разработан совместно компаниями Cybernet Systems и Cadence Design Systems. Используя PSPICE SLPS, можно вставить электрическую схему PSPICE в функциональную схему Simulink и объединить функциональное и схемотехническое моделирование схемы. Эта система объединяет преимущества каждого из моделирующих устройств [8], однако и недостатки также объединяются. Увеличиваются требования к ресурсам рабочей станции, усложняется выбор параметров моделирования, удлиняется время расчета. Немаловажное значение имеет и необходимость приобретения отдельной лицензии на использование интерфейса.

Расчет динамических потерь в полупроводниковых ключах, используемый для общей оценки характеристик анализируемой преобразовательной системы, может быть реализован и средствами MATLAB/Simulink.

Рассмотрим процесс переключения ключа, работающего на индуктивную нагрузку [9]. Диаграммы токов и напряжений приведены на рис. 2, а. V_{in} – напряжение на ключе, I_o – ток ключа. Процесс переключения ключа длится конечное время: включение – t_{on} , выключение – t_{off} .

Диаграмма мгновенной мощности потерь в ключе приведена на рис. 2, б. Видно, что мощность потерь при включении (p_{on}) и выключении (p_{off}) ключа определяется конечной скоростью переключения ключа и ненулевыми значениями тока/напряжения на интервалах переключения. Соответствующие значения энергии коммутации при определенных значениях коммутируемого напряжения V_{in} и тока I_o – E_{on} и E_{off} – являются справочными данными [6]. С ростом частоты переключений доля коммутационных потерь растет и может превысить статические потери в ключе (потери на проводимость – p_{con}).

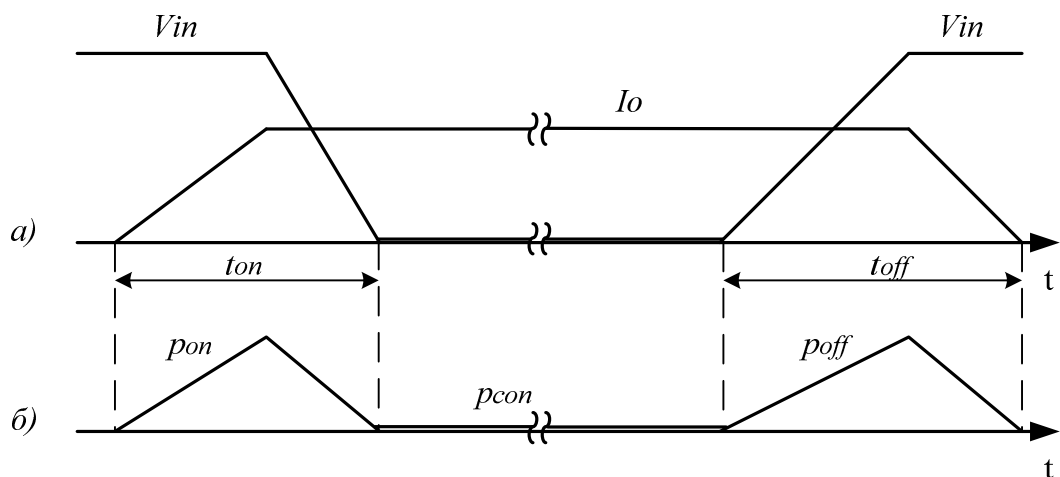


Рис. 2. Коммутационные потери в транзисторе.

Модели ключей и алгоритм расчета системы MATLAB, как указывалось выше, предполагает мгновенную коммутацию ключа. Диаграммы токов и напряжений при таком переключении ключа приведены на рис. 3. По оси абсцисс отложены номера тактов расчета. При существующей модели ключа возможен учет лишь статических потерь. Динамические потери не могут быть учтены в связи с отсутствием самого процесса коммутации ключа – переключение происходит мгновенно при поступлении сигнала управления V_{con} .

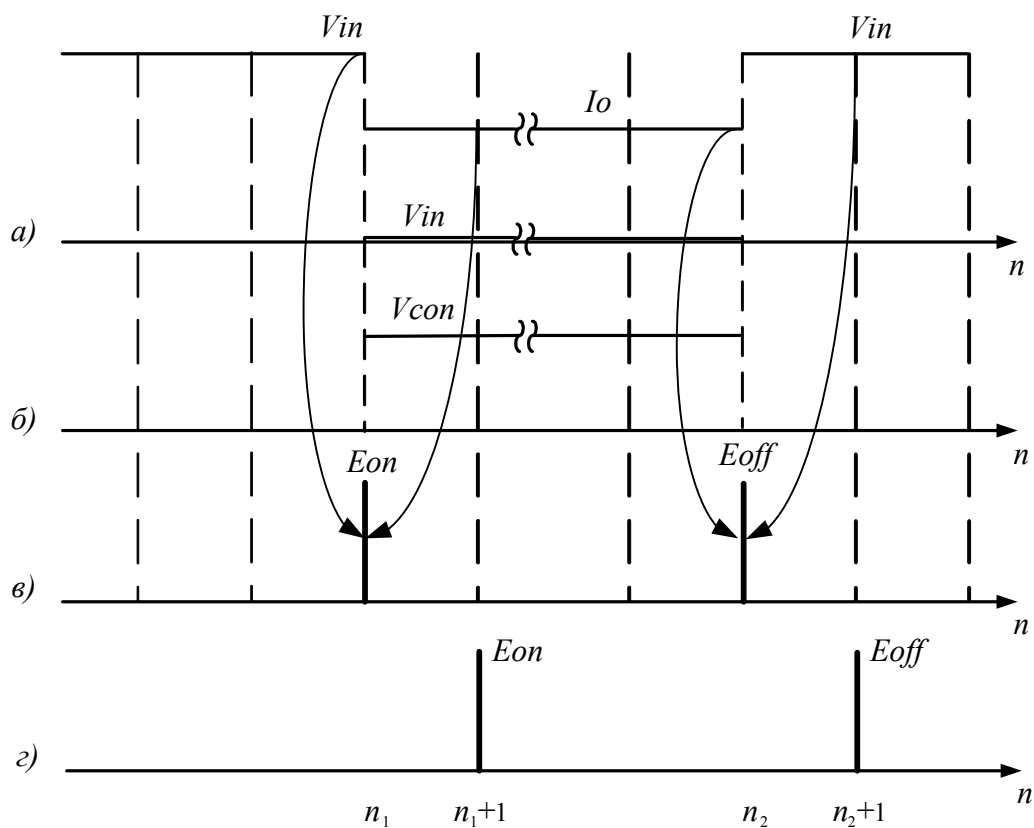


Рис. 3. Процесс переключения транзистора в MATLAB.

Однако, поскольку значения энергии E_{on} и E_{off} являются справочными данными, их можно связать с соответствующими моментами коммутации. В этом случае энергия потерь на включение/выключение представляется δ -импульсом в момент коммутации (рис. 3, в). Для определения величины энергии в соответствии с (3) необходимо знать ток и напряжение в момент коммутации (точнее, при включении – значение напряжения слева от точки коммутации, а тока – справа от нее, а при выключении – значение тока слева от точки коммутации, а напряжения – справа). В соответствии с алгоритмом расчета MATLAB, в момент появления сигнала управления (шаг n_1) напряжение на ключе соответствует требуемому значению, однако ток еще не изменил свое значение. Ток коммутации может быть получен на шаге $(n_1 + 1)$. Аналогично, при выключении ключа (шаг n_2) ток коммутации соответствует требуемому значению, а напряжение коммутации может быть получено на шаге $(n_2 + 1)$. Процесс получения данных показан стрелками на рис. 3. Расчетное значение энергии может быть получено не ранее $(n_1 + 1)$ и $(n_2 + 1)$ шагов (рис. 3, г). Интервал времени между моментом коммутации и моментом получения значения тока/напряжения коммутации может быть увеличен. Увеличение интервала целесообразно в случае наличия переходных процессов в момент коммутации, например, связанных с вычислительной неустойчивостью системы.

В соответствии с предложенным алгоритмом расчета динамических потерь, измерительная подсистема должна подключаться к модели ключа K так, чтобы иметь возможность контролировать сигнал управления ключом, измерять напряжение на ключе и тока ключа. Схема подключения измерительной подсистемы приведена на рис. 4.

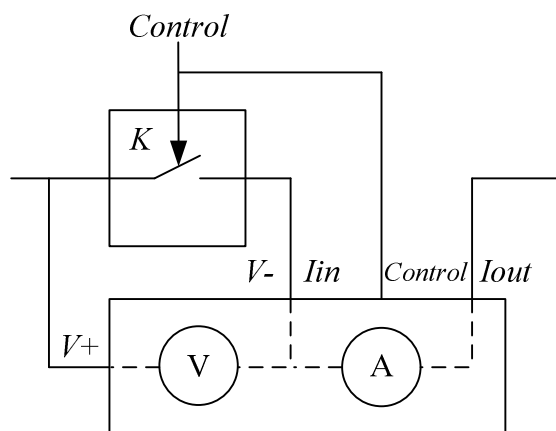


Рис. 4. Подключение измерительной подсистемы к ключу.

Блок-схема измерительной подсистемы приведена на рис. 5. Подсистема включает три канала, выделенных цветом. Канал измерения тока и напряжения соответствует рис. 4. Каналы определения энергии потерь включения и выключения работают в соответствии с алгоритмом, приведенным выше и иллюстрированным на рис. 3. Для определения моментов включения/выключения ключа используются блоки Hit Crossing , соответственно передний и задний фронты, а для получения значения переменной справа от точки коммутации – блок Memory . Вычисления проводятся в соответствии с выражениями (2). Для согласования временного положения импульсных сигналов $I_{on(+0)}$ и $U_{on(-0)}$, $I_{off(-0)}$ и $U_{off(+0)}$ установлены блоки Memory2 и Memory3 . На выходе подсистемы формируются импульсные сигналы с величиной, равной энергии потерь включения/выключения, расположенные на шаг вычислений правее соответствующей точки коммутации.

Для упрощения ввода данных для IGBT типа SK60GAR123 можно воспользоваться m-файлом следующего содержания:

```
Eon_base=9.9e-3
Ion_base=50
Uon_base=600
Eoff_base=5.3e-3
Ioff_base=50
Uoff_base=600
Kv=1.4
```

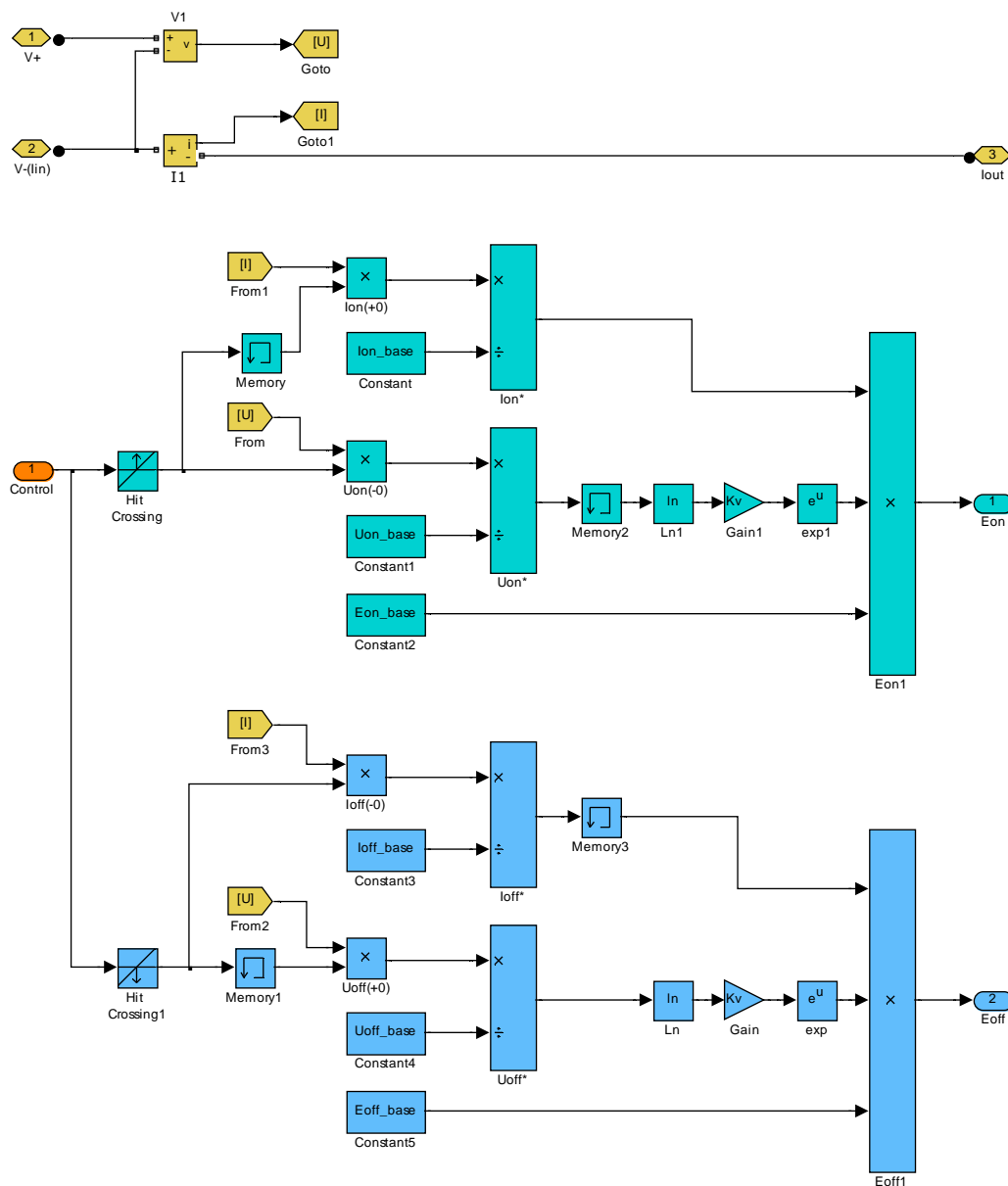


Рис. 5. Блок-схема измерительной подсистемы для определения энергии потерь включения/выключения. Блок E_{on_Eoff} .

Использование импульсных сигналов, соответствующих энергии потерь, связано с рядом сложностей и не формирует наглядного представления. Для перехода к более традиционному представлению – мощности потерь, значения энергии интегрируется по

времени (дискретные значения суммируются) и результат усредняется за время измерения. Один из возможных вариантов блок-схемы подсистемы перехода от дискретных значений энергии потерь к средней мощности потерь приведен на рис. 6.

Подсистема определения энергии потерь включения/выключения представлена блоком E_{on_Eoff} . Блоки Sum и Memory осуществляют суммирование с накоплением дискретных значений энергии потерь. На выходе подсистемы формируется значение средней мощности потерь за время измерения.

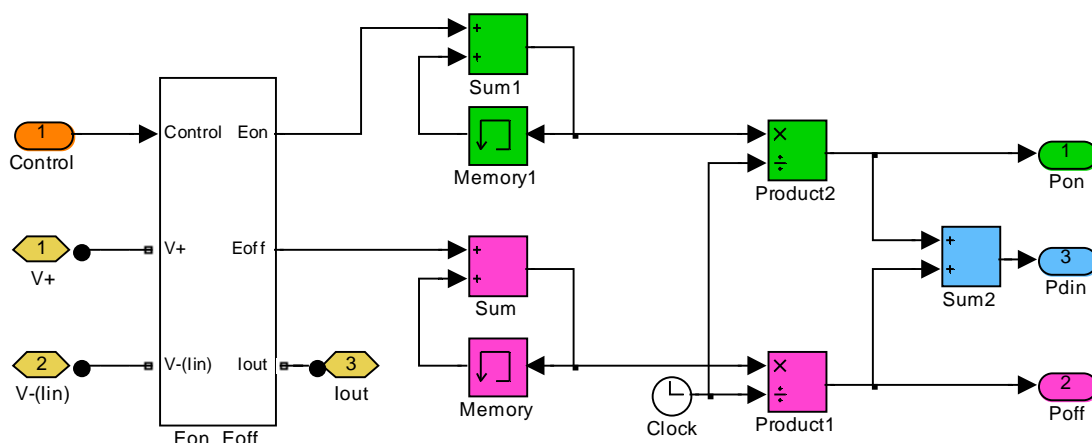


Рис. 6. Блок-схема подсистемы пересчета энергия – мощность. Блок P_{on_Poff} .

Для проверки работоспособности предложенных методик определения динамических потерь в силовых полупроводниковых ключах разработана тестовая схема преобразователя, MATLAB-модель которой приведена на рис. 7. В качестве базового преобразователя принят понижающий преобразователь с IGBT модулем SK60GAR123. Подсистема расчета средней мощности динамических потерь представлена блоком P_{on_Poff} .

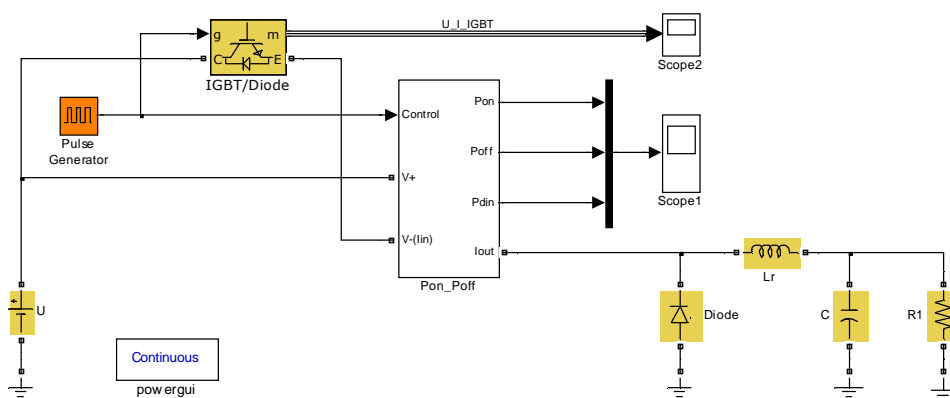


Рис. 7. Тестовая схема преобразователя в MATLAB.

Сравнение результатов вычислений средней мощности потерь в среде MATLAB и программой Semisel проводилось для трех режимов работы схемы, отличающихся напряжением на IGBT и током нагрузки. Контрольные значения мощности потерь получены путем расчета по выражениям (2) и (3) для идеального преобразователя. Полученные данные сведены в таблицу.

Таблица

напряжение на IGBT, В	ток нагрузки, А	Потери, Вт		
		Semisel	MATLAB	Расчет по (2) (3)
600	25	35	38	38
300	25	13	14,4	14,4
300	50	30	29	28,8

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод о совпадении результатов моделирования в системе MATLAB с теоретически ожидаемыми. Отклонение значений мощности, полученных в MATLAB и Semisel, лежит в диапазоне 3-9%, что является допустимым.

Выводы.

Предложенный подход к определению динамических потерь в ключах объединил возможности определения потерь программ подобных Semisel с функциональностью MATLAB.

Разработана методика определения в MATLAB-модели преобразователя динамических потерь в полупроводниковых ключах на основании известных зависимостей энергии включения E_{on} и энергии выключения E_{off} .

Созданы блок-схемы измерительных подсистем.

В процессе расчета потерь выделяются потери на включение и потери на выключение силовых полупроводниковых ключей, что расширяет возможности анализа преобразовательной системы.

Результаты моделирования показали совпадение результатов расчетов по предложенной методике с результатами расчетов программ, рекомендуемых изготовителями полупроводниковых приборов.

Литература

1. *M. H. Rashid, H. M. Rashid. SPICE for Power Electronics and Electric Power. Second Edition - CRC Press, Taylor & Francis Group, the academic division of T&F Informa plc. Boca Raton London New York, 2006 – 530 p.*
2. *M. Cotorogea Physics-Based SPICE-Model for IGBTs With Transparent Emitter // IEEE Trans. Power Electron., vol. 24, no. 12, p.p. 2821-2832, Dec. 2009.*
3. *Недолужко И, Лебедев А. Методика определения параметров PSPICE моделей IGBT транзисторов // Силовая электроника №2, 2005 С. 100-103*
4. *Колпаков А. И. Моделирование транзисторов IGBT с помощью PSPICE // Компоненты и технологии. 2002. № 8 С. 134-139.*
5. SEMISEL Simulation. <http://www.semikron.com/skcompub/en/index.htm?mode=semisel>
6. Datasheet SK60GAL123 http://www.semikron.com/products/data/cur/assets/SK_60_GAR_123_24602801.pdf
7. *Колпаков А.И., Карташев Е.Е. Принципы работы и особенности программы теплового расчета SEMISEL // Электронные компоненты (силовая электроника). М. – 2004. №6. С. 94-102.*
8. *Златин И. Интеграция программ OrCAD и MATLAB/Simulink при помощи интерфейса SLPS // Силовая электроника. М. – 2006. №2. С. 76-83.*
9. *N. Mohan First courses on power electronic and drives – MNPERE, Minneapolis, 2003 – 251 p.*