

Автор: Новиков П.А.

Наш сайт: www.electrum-av.com

Расчёт тепловых потерь транзисторного ключа относительным графическим методом

Современная силовая электроника всё ближе подбирается к области высоких частот и, как следствие, как никогда остро встаёт вопрос расчёта динамических потерь. Но, в сравнении со статическим режимом работы, динамические потери подсчитать куда как сложнее. При обилии источников информации на данную тему рассчитать мощность потерь предложенными математическими способами неподготовленному человеку весьма затруднительно. Потому необходим более простой метод, но обладающий достаточной достоверностью, чтобы произвести хотя бы ориентировочные расчёты; о таком методе и пойдёт речь в данной статье.

Потери на транзисторном ключе работающем в ключевом режиме складываются из трёх составляющих: потери в статическом режиме (P_c), потери в динамическом режиме (P_d) и потери на обратном диоде. При этом потерями на обратном диоде, как правило, можно пренебречь. Исключение здесь составляют случаи, когда время обратного восстановления диодов недопустимо велико, либо в полумостовой схеме имеют место быть значительные сквозные токи, что так же является не совсем нормальной ситуацией. Для среднестатистического отлаженного преобразователя потери на обратном диоде составляют не более нескольких процентов от общих потерь даже на частотах порядка 100 кГц, а потому в дальнейших расчётах этими составляющими потерь можно пренебречь.

Статические потери рассчитываются по общеизвестной формуле:

$$P_c = U_{кэ} \times I_k$$

Где $U_{кэ}$ – падение напряжения коллектор-эмиттер при токе I_k ; I_k – ток коллектора. Аналогичным образом рассчитываются потери и для MOSFET-транзистора, за тем исключением, что падение напряжения на переходе сток-исток рассчитывается через произведение тока стока на сопротивление канала в открытом состоянии. Для IGBT, в свою очередь, падение напряжения коллектор-эмиттер является справочным параметром ($V_{CE(ON)}$), при этом изменение напряжение в зависимости от тока коллектора можно не учитывать, т.к. для IGBT данная величина почти не зависит тока (в допустимой области статических нагрузок).

С динамическими потерями гораздо сложнее. При желании рассчитать динамические потери разработчик сталкивается с кучей страшных формул, интегралов и не совсем понятных величин. Более того, как правило, такие расчеты оказываются не совсем точными, т.к. не учитывается целый ряд моментов, которых нет теоретически, но которые всегда есть практически, как, например, значительно большие токи и напряжения при выключении транзистора на индуктивной нагрузке. В свою очередь, если представить процессы работы транзистора в качестве ключа в графическом виде, то интегралы сразу становятся привычными площадями, а из величин, с которыми надо работать, остаются только справочные и основные параметры для рассчитываемой схемы. Процесс работы транзисторного ключа (как MOSFET, так и IGBT) схематически изображён на рисунке 1.

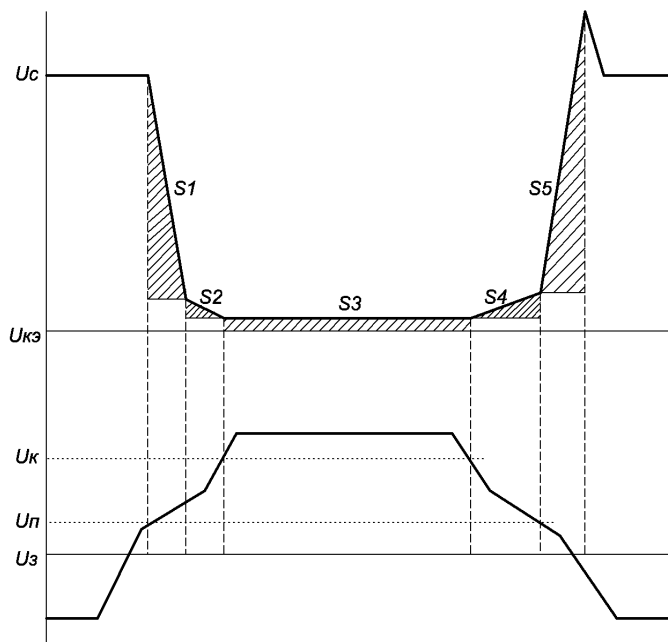


Рисунок 1 – Схема работы транзисторного ключа

Где U_c – силовое напряжение питания (коммутируемое напряжение); $U_{кэ}$ – напряжения коллектор-эмиттер; U_k – напряжение соответствующее переходу транзистора в ключевой режим (исходя из его ВАХ); U_p – пороговое напряжение транзистора; U_z – напряжение (сигнал) на затворе транзистора.

При переключении ключ работает следующим образом:

В момент достижения сигнала на затворе порогового напряжения транзистор начинает отпираться. Длительность фронта отпирания, в первом приближении, является справочным параметром транзистора (t_r) и мало зависит от нагрузки или управления. Далее транзистор находится в активном режиме до тех пор, пока напряжение на затворе не достигнет достаточного уровня, чтобы транзистор перешёл в ключевой режим. Это время зависит от целого ряда факторов, обусловленных как самим транзистором (в частности, величина ёмкости Миллера), так и режимами его управления (мощность драйвера) и током нагрузки в момент включения. После этого следует статический режим работы. При запираании транзистора порядок обратный: транзистор переходит в активную область ВАХ и по достижению напряжения на затворе порогового напряжения, а так же после рассасывания неосновных носителей заряда, транзистор закрывается. Длительность фронта запираения так же можно считать справочным параметром (t_f), который мало зависит от режимов эксплуатации; исключения составляют случаи, когда фронт специально «валится» снабберными цепями. Таким образом, при работе транзистора ключом мы получаем пять геометрических фигур (площадей): S1 – обусловлен длительностью включения транзистора; S2 – длительностью работы транзистора в активной области при включении; S3 – длительностью работы в статическом открытом состоянии; S4 – длительностью работы транзистора в активной области при выключении; S5 – длительностью выключения транзистора. Рассмотрим каждую из этих областей в отдельности.

Как уже было сказано, площадь S1 обусловлена длительностью включения транзистора (t_r) и, соответственно, силовым коммутируемым напряжением. Отсюда площадь треугольника:

$$S1 = (U_c \times t_r) / 2$$

Чтобы прояснить ситуацию с площадями включения перейдём сразу к площади S2.

Ошибочно полагать, что затянутый фронт управления затвором или значительные токи коллектора при включении приводят к изменению длительности справочного фронта t_f и, тем самым, к увеличению площади $S1$. Эта ошибка проистекает из того, что, в отличие от рисунка, в реальной схеме $S1$ плавно переходит в $S2$ и если ток при включении значителен (например, при работе на емкостную составляющую нагрузки), то в начальный момент, когда транзистор находится в самом начале своей активной области ВАХ, на переходе падает всё приложенное напряжение питания, как при КЗ; далее ток, ограничиваемый транзистором, увеличивается (при увеличении напряжения на затворе) и, тем самым, падение напряжения коллектор-эмиттер уменьшается. Таким образом, длительность горизонтального катета $S2$ обусловлена длительностью переднего фронта сигнала управления ($t_{пф}$); длительность вертикального катета обусловлена током нагрузки: чем больше ток, тем больше будет падать напряжение на переходе коллектор-эмиттер. Падение напряжения в данной области, в большинстве случаев, составляет 10...20-ю часть от силового напряжения питания, при работе на активно-индуктивную нагрузку, хотя, разумеется, в некоторых схемах может значительно отличаться от указанного диапазона. Но т.к. в данной статье приводится типовый расчёт, то взяв указанное типовое значение, мы получим следующую формулу (для худшего случая):

$$S2 = (0,1 \times U_c \times t_{пф}) / 2$$

Аналогично для процесса выключения, с той лишь разницей, что здесь учитывается длительность выключения сигнала управления ($t_{зф}$).

$$S4 = (0,1 \times U_c \times t_{зф}) / 2$$

К слову сказать, при организации плавного выключения транзистора меняется, опять же, площадь $S4$, а не $S5$. Благодаря затянутой работе транзистора в активной области индуктивность нагрузки «отдаёт» ток медленнее, тем самым и уменьшается индуктивный выброс, при этом, если обратить внимание на работу реального ключа, длительность самого фронта выключения при плавном выключении управления почти не меняется. Затягивание фронта $S5$ осуществляется дополнительно снабберным конденсатором, но это к теме настоящей статьи не относится.

Далее, как и для площади $S1$, считается площадь $S5$. Но здесь сделана поправка: как правило, при работе на индуктивную составляющую нагрузки, при выключении транзистора имеет место быть индуктивный выброс, характеризуемый большим, относительно U_c , напряжением и, соответственно, током. Величина этого выброса может доходить до удвоенного напряжения питания даже при штатной работе отлаженного преобразователя. Таким образом, площадь $S5$, по причине удвоенного (для худшего случая) напряжения так же увеличивается относительно площади $S1$:

$$S5 = 2 \times (U_c \times t_f) / 2 = U_c \times t_f$$

Площадь $S3$ – это площадь статических потерь для одного периода. Рассчитывается данная площадь как произведение падения напряжения коллектор-эмиттер на длительность статического открытого состояния (t_c):

$$S3 = U_{кэ} \times t_c$$

С другой стороны $S3$ можно выразить через мощность статических потерь:

$$S3 = P_c / s$$

Где s – скважность.

В итоге получаем следующую формулу суммы динамических потерь:

$$S_{сум} = S1 + S2 + S4 + S5$$

Из вышеизложенного следует:

$$S_{\text{сум}} = (U_c \times t_r) / 2 + (0,1 \times U_c \times t_{\text{пф}}) / 2 + (0,1 \times U_c \times t_{\text{зф}}) / 2 + U_c \times t_f$$

Где:

U_c – силовое напряжение питания;

t_r – длительность фронта включения транзистора (справочный параметр);

t_f – длительность фронта выключения транзистора (справочный параметр);

$t_{\text{пф}}$ – длительность фронта включения сигнала управления на затворе;

$t_{\text{зф}}$ – длительность фронта выключения сигнала управления на затворе.

Но, если применить данную формулу, в итоге мы получим совершенно абстрактную и ни к чему не применимую цифру, выражаемую в S_c с единицей измерения В х мкс. Поэтому, чтобы вышеуказанная формула приобрела физический смысл необходимо внести понятие относительности. Относительность же заключается в сравнении площадей $S_{\text{сум}}$ и S_3 для каждого периода. Отсюда вводится относительный коэффициент k :

$$k = S_{\text{сум}} / S_3$$

Данный коэффициент выражает во сколько раз динамические потери больше (или меньше) статических потерь в один период. Следовательно, динамические потери равны:

$$S_{\text{сум}} = S_3 \times k$$

Если данное выражение записать через мощность, то получим:

$$P_d = (P_c / s) \times k$$

Рассчитаем динамические потери для следующего случая: транзистор со справочными параметрами: $V_{CE(ON)} = 2,5$ В; $t_r = 20$ нс (0,02 мкс); $t_f = 30$ нс (0,03 мкс). Транзистор работает на активно-индуктивную нагрузку при напряжении силовой цепи $U_c = 500$ В с длительностью управляющих фронтов включения/выключения (по уровню 0 / 10 В) 0,5 / 1 мкс; ток коллектора составляет 10 А. Расчёт произведём для частоты 1 кГц (меандр; длительность открытого состояния 500 мкс) и для частоты 50 кГц (так же меандр, длительность открытого состояния 10 мкс).

Для частоты 1 кГц:

$$P_c = 2,5 \times 10 = 25 \text{ Вт};$$

$$S_3 = 2,5 \times 500 = 1250$$

$$S_{\text{сум}} = (500 \times 0,02) / 2 + (0,1 \times 500 \times 0,5) / 2 + (0,1 \times 500 \times 1) / 2 + 500 \times 0,03 =$$

$$= 5 + 12,5 + 25 + 15 = 57,5$$

$$k = 57,5 / 1250 = 0,046$$

$$P_d = (25 / 2) \times 0,046 = 0,575 \text{ Вт}$$

Таким образом, мощность статических потерь составляет 12,5 Вт; динамических – 0,6 Вт, т.е. динамические потери в 20 раз меньше статических.

Аналогично рассчитаем для частоты 50 кГц:

$$P_c = 2,5 \times 10 = 25 \text{ Вт};$$

$$S_3 = 2,5 \times 10 = 25$$

$$S_{\text{сум}} = (500 \times 0,02) / 2 + (0,1 \times 500 \times 0,5) / 2 + (0,1 \times 500 \times 1) / 2 + 500 \times 0,03 =$$

$$= 5 + 12,5 + 25 + 15 = 57,5$$

$$k = 57,5 / 25 = 2,3$$

$$P_d = (25 / 2) \times 2,3 = 28,75 \text{ Вт}$$

Мощность статических потерь составляет 12,5 Вт; динамических – 28,75 Вт, т.е. динамические потери более чем в два раза больше статических.

Сделаем расчёт того же случая на той же частоте 50 кГц, но при скважности 10.

$$P_c = 2,5 \times 10 = 25 \text{ Вт};$$

$$S_3 = 2,5 \times 2 = 5$$

$$S_{\text{сум}} = (500 \times 0,02) / 2 + (0,1 \times 500 \times 0,5) / 2 + (0,1 \times 500 \times 1) / 2 + 500 \times 0,03 =$$

$$= 5 + 12,5 + 25 + 15 = 57,5$$

$$k = 57,5 / 5 = 11,5$$

$$P_d = (25 / 10) \times 11,5 = 28,75 \text{ Вт}$$

Что и следовало доказать: мощность динамических потерь не изменилась (т.к. частота осталась без изменений) и составляет 28,75 Вт, но при этом, относительно, динамические потери стали в 11,5 раз больше статических.

Данный метод отличается простотой, наглядностью и требует для расчёта только самых основных параметров. Единственный минус такого метода: нельзя сравнивать площади, если токи в этих площадях различны. Например, если ток имеет треугольную форму, отставая или опережая напряжение по фазе, то рассчитывать потери таким образом было бы некорректно.

Как видно из вышеизложенного, суть метода в относительном сравнении легко рассчитываемой мощности статических потерь с динамическими потерями через площади при заданном токе. Отсюда проистекает тот вывод, что можно сравнивать не только суммарные мощности, но и мощности включения, выключения и т.п. в отдельности. Например, из указанного примера (для случая 50 кГц, скважность 2) видно, что мощность потерь на выключение составляет $k = 15 / 25 = 0,6$; $P = (25 / 2) \times 0,6 = 7,5 \text{ Вт}$. Следовательно, имея рабочую схему и проанализировав её указанным методом, можно не только узнать, каковы её динамические потери, но и какой именно момент в её работе лучше исправить. Конечно, точность относительного графического способа оставляет желать лучшего, ведь на практике геометрические фигуры не идеальны и ток, в процессе коммутации, не всегда один и тот же, но, тем не менее, для ориентировочного расчёта – самое то.