

УДК 621.3.06

Статическая симметрия напряжений при последовательном соединении твердотельных коммутирующих приборов

М.В. Малашин, С.И. Мошкунов, С.В. Небогаткин, В.Ю. Хомич

Представлены результаты исследования статического распределения рабочих параметров в цепи последовательно соединенных биполярных транзисторов с изолированным затвором. Показана устойчивость такой системы, математически обоснована область безопасной работы подобных сборок.

PACS: 84.70.+p

Ключевые слова: транзисторы, последовательное соединение, распределение параметров.

Введение

Эффективным средством повышения рабочих характеристик современных электронных ключей, например, таких как биполярные транзисторы с изолированным затвором (БТИЗ, IGBT) и металл-окисел-полупроводник (МОП, MOSFET) является их последовательно-параллельное соединение [1–5]. При этом неизбежно возникает вопрос равномерного распределения нагрузки на отдельные приборы или так называемый вопрос симметрии [6, 7]. Для надежной работы составного ключа на основе последовательного соединения БТИЗ необходимо обеспечить статическое и динамическое распределение токов и напряжений.

Равенство токов всех транзисторов как в статическом, так и в динамическом режиме обычно обеспечивает топология схемы. Однако неидентичность отдельных транзисторов может приводить к сильному разбросу напряжений коллектор–эмиттер. Для надежной работы необходимо, чтобы каждый транзистор работал в пределах области безопасной работы, устанавливаемой производителем.

Традиционно вопросы статического и динамического симметрирования решаются применением пассивных выравнивающих компонентов, снабберных цепей [6] или цепей ограничения на-

пряжений, выбором симметричной конструкции, а в ряде случаев — способами активной симметрии на основе быстродействующей обратной связи [6–9].

В настоящей статье рассмотрен вопрос статического распределения рабочих параметров в цепи последовательно включенных БТИЗ. Представлены экспериментальные данные и основанная на них математическая модель для большого количества последовательно соединенных приборов.

Обсуждение

На рис. 1 представлены экспериментально полученные ВАХ транзистора IRG4S40B120UD. Данная модель транзистора выбрана по совокупности характеристик, важных при последовательном соединении приборов [10].

Как можно видеть, БТИЗ при нулевом напряжении затвор–эмиттер находится в непроводящем состоянии и ток через него определяется только током утечки, который зависит от температуры кристалла и приложенного напряжения. Напряжение пробоя, характеризующееся резким ростом тока через кристалл, увеличивается с ростом температуры кристалла T_j [11].

$$i_{kn} = i_{kn}(V_{kn}, T_{jn}) \quad (1)$$

До напряжения пробоя характерна линейная зависимость тока утечки от приложенного напряжения [12]. Рассмотрим систему из двух последовательно включенных БТИЗ. Оба БТИЗ находятся в непроводящем состоянии, т.е. $V_{зз} = 0$.

В качестве дестабилизирующего систему фактора определим разную температуру кристаллов БТИЗ. Для определения рабочей точки системы воспользуемся методом нагрузочной кривой. Точка пересечения ВАХ определяет условия работы такой системы.

Малашин Максим Владимирович, ст. научн. сотр.

Мошкунов Сергей Игоревич, зав. лабораторией.

Небогаткин Сергей Вячеславович, мл. научн. сотр.

Хомич Владислав Юрьевич, зам. директора.

Институт электрофизики и электроэнергетики РАН.

Россия, 191186, Санкт-Петербург,

Дворцовая набережная, 18.

Тел.: (499) 135–11–95.

E-mail: khomich@ras.ru; m_malashin@mail.ru

Статья поступила в редакцию 15 ноября 2013 г.

© Малашин М.В., Мошкунов С.И., Небогаткин С.В., Хомич В.Ю., 2013

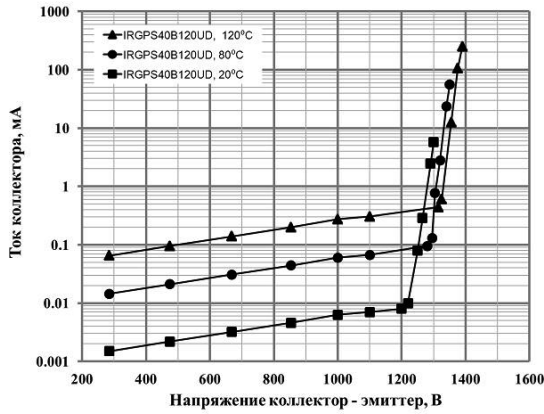


Рис. 1. Ток утечки транзистора модели IRG40B120UD при различных температурах кристалла.

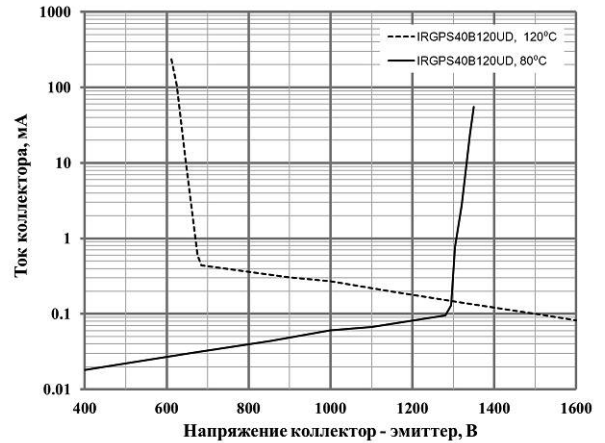


Рис. 2. Графический метод определения рабочей точки для двух последовательно включенных БТИЗ с разными температурами кристаллов.

Рис. 2 иллюстрирует графический метод определения рабочей точки для двух последовательно включенных БТИЗ, с разными температурами кристаллов. Из рисунка получаем, что пересечение кривых дает рабочую точку $V_{80^\circ\text{C}} = 1310\text{ В}$, $V_{120^\circ\text{C}} = 690\text{ В}$, $I = 0,14\text{ мА}$. Таким образом, мощность потерь, обусловленная током утечки, менее нагретого транзистора ($P = 183\text{ мВт}$) больше, чем мощность потерь более нагретого транзистора ($P = 97\text{ мВт}$), что приводит, в конечном итоге, к выравниванию напряжений в системе последовательно включенных БТИЗ.

Теперь рассмотрим сборку из N транзисторов, включенных последовательно. Математически такая задача сводится к решению системы уравнений:

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^N V_{kn} &= N \cdot V_0 \\ i_{kn} &= f(V_{kn}, T_{jn}) \\ i_{k1} &= i_{k2} = \dots = i_{kN} = i \end{aligned} \quad (2)$$

где V_{kn} — падение напряжения коллектор—эмиттер на n -м транзисторе сборки, N — число последовательно соединенных транзисторов, $V_0 = V_{\text{Block}}/N$, где V_{Block} — блокируемое напряжение для всей сборки транзисторов, i_{kn} — ток коллектор—эмиттер через n -й транзистор.

Напряжение на одном произвольно взятом транзисторе:

$$V_1 = NV_0 - \sum_{n=2}^N V_n \quad (3)$$

Предположим, что кристаллы транзисторов со 2-го по N -й имеют одинаковую температуру, например, 80°C и ВАХ этих транзисторов одинаковы. А температура кристалла 1-го транзистора (случайным образом выбранного из сборки транзисторов) отличается от температуры остальных. Тогда из (3) имеем:

$$V_1 = NV_0 - (N-1)V_2 \quad (4)$$

На рис. 3 представлено графическое решение уравнения (4) для двух значений температуры 1-го транзистора (120°C и 80°C).

Рассмотрим эти решения. При последовательном соединении ток через все транзисторы одинаков ($I_{120^\circ\text{C}} = 76,8\text{ мкА}$, $I_{80^\circ\text{C}} = 60,5\text{ мкА}$). Тогда видно, что падение напряжения на горячем транзисторе ($V_{120^\circ\text{C}} = 400\text{ В}$) меньше, чем на холодном транзисторе ($V_{80^\circ\text{C}} = 1000\text{ В}$). Стоит также отметить, что относительное изменение тока утечки всей системы невелико ($\Delta I = I_{120^\circ\text{C}} - I_{80^\circ\text{C}} = 16,3\text{ мкА}$), и, наоборот, падение напряжения на нагреваемом транзисторе ($\Delta V = V_{120^\circ\text{C}} - V_{80^\circ\text{C}} = -700\text{ В}$) меняется достаточно сильно.

Таким образом, в режиме “блокировки” приложенного напряжения нагрев одиночного транзистора не выводит всю систему последовательно включенных БТИЗ из равновесия. Более того, за счет перераспределения мощности потерь такая система имеет тенденцию самостабилизироваться.

Все сказанное, однако, справедливо лишь при условии определенного запаса по напряжению БТИЗ. Для количественной оценки этого запаса введем коэффициент:

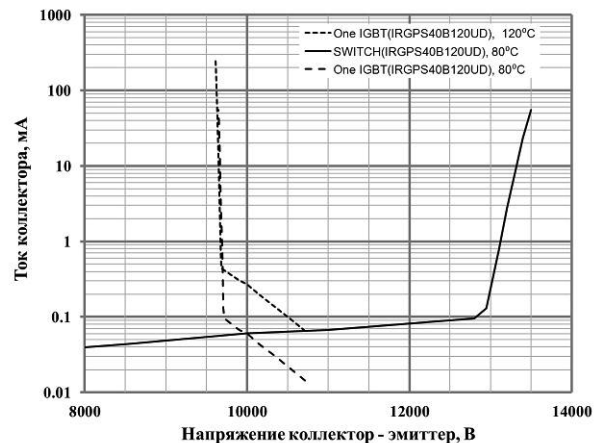


Рис. 3. Графическое решение уравнения (4) для двух значений температуры 1-го транзистора (120°C и 80°C).

$$\gamma = \frac{V_{BD}}{V_0}, \quad (5)$$

где V_{BD} — это пробивное напряжение одиночного транзистора.

Эксперименты, проведенные с несколькими типами современных БТИЗ с NPT-структурой показали, что надежная работа составного ключа достигается при $\gamma > 1,2$.

Рассмотрим случай, когда рабочие точки всех транзисторов лежат на пологом участке ВАХ (ус-

ловия справедливости будут получены ниже). Тогда, зависимость тока коллектор—эмиттерот приложенного напряжения и температуры кристалла транзистора определяется следующим выражением [13]:

$$i = f(V_{kn}; T_{jn}) = i_0 e^{\alpha V_{kn} + \beta T_{jn}}. \quad (6)$$

Экспериментально полученные значения параметров для нескольких моделей БТИЗ представлены в таблице.

Таблица

Модель БТИЗ	V_{BD} , В (20 °С)	α , мА/В	β ($\Delta T = 20$ °С), 1/°С
IRGB5B120KD	1200	$0,078 \cdot 10^{-6}$	$8,7 \cdot 10^{-5}$
IRGPS40B120UD	1200	$7,104 \cdot 10^{-6}$	$1,69 \cdot 10^{-3}$
IRG4PC40UD	600	$7,104 \cdot 10^{-6}$	$1,69 \cdot 10^{-3}$

Логарифмируя обе части (6) и суммируя по n и учитывая (2) получим:

$$\alpha V_{Block} + \beta \sum_{n=1}^N T_{jn} = N \ln \frac{i}{i_0} \quad (7)$$

Откуда имеем

$$i = i_0 e^{\alpha V_0 + \beta \bar{T}_j}. \quad (8)$$

Уравнение (8) устанавливает связь между током утечки и рабочими параметрами отдельного транзистора. Важно отметить, что в рассматриваемом случае ток утечки зависит только от средних значений напряжения и температуры всех транзисторов.

Найдем условие справедливости полученных выражений. Из условия $V_{kn} < V_{BD}$ и выражений (8), (6) получим:

$$\frac{\bar{T}_j - T_{jn}}{\alpha / \beta} < V_{BD} - V_0. \quad (9)$$

В численном выражении для $\gamma = 1,2$ условие (9) означает, что разность температуры отдельных транзисторов не должна превышать

$$\Delta T < \frac{\alpha}{\beta} (V_{BD} - V_0) = \frac{\beta \cdot V_0}{\alpha} \cdot (\gamma - 1). \quad (10)$$

Последнее выражение показывает важность наличия запаса по напряжению, определяемого параметром γ .

Заключение

Несмотря на общую практику добавления пассивных RC-цепей при последовательном соединении нескольких транзисторов, в настоящей работе обоснован отказ от их применения для статического симметрирования рабочих параметров. Показано, что в режиме “блокировки” приложенного напряжения нагрев одиночного транзистора не выводит всю систему последовательно включенных БТИЗ из равновесия. Более того, за счет перераспределения мощности потерь такая систе-

ма имеет тенденцию самостабилизироваться. При этом важно обеспечить запас по напряжению, определяемый коэффициентом запаса ($\gamma = V_{BD}/V_0$). Таким образом, можно сделать вывод, что в ряде практически важных случаев можно отказаться от использования в цепях последовательно соединенных БТИЗ дополнительных элементов, таких как снабберы или ограничители напряжения, устраняющие разброс напряжений между отдельными БТИЗ сборки.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 12-08-01346-а).

Литература

1. Иванов Е.В., Мошкунов С.И., Хомич В.Ю. Генератор высоковольтных наносекундных импульсов на основе биполярных транзисторов с изолированным затвором. — Москва: ИПЭФ РАН, 2004.
2. Иванов Е.В., Мошкунов С.И., Хомич В.Ю. // Прикладная физика. 2006. № 2. С. 122.
3. Грязнов О.В., Иванов Е.В., Малашин М.В., Мошкунов С.И., Хомич В.Ю. // Прикладная физика. 2008. № 5. С. 32.
4. Мошкунов С.И., Небогаткин С.В., Ребров И.Е., Хомич В.Ю., Ямщиков В.А. // Прикладная физика. 2011. № 6. С. 32.
5. Мошкунов С.И., Небогаткин С.В., Ребров И.Е., Хомич В.Ю., Ямщиков В.А. // Квантовая электроника. 2011. Т. 41, № 12, С. 1093.
6. Wintrich A., Nicolai U., Tursky W., Reimann T. Application Manual Power Semiconductors. — Ilmenau, Germany: ISLE Verlag. SEMICRON International GmbH, 2011.
7. Khanna V.K. The insulated gate bipolar transistor (IGBT): theory and design. — A Wiley-Interscience publication, 2003.
8. Bruckmann M., Sigg J., Türkes P. // Kolloquium Halbleiter-Leistungsbaulemente und Materialgüte von Silizium. Freiburg. 1995. V. 6

9. Bruckmann M.// ETG-Fachtagung. Bad Nauheim. 1998. Proc. P. 221.

10. International Rectifier. Insulated Gate Bipolar Transistor IRG4B120U.— Data sheet. PD-94295B.

11. International Rectifier. AN-990 Application Characterization of IGBT.— INT990.

12. International Rectifier. IGBT Characteristics.— Application Note AN-983.

13. Schlapbach U., Rahimo M., von ArxC., Mukhitdinov A., Linder S./ IEEE Proceedings of the 19th International Symposium on Power Semiconductor Devices & ICs. Jeju. 2007. P. 9.

Static voltage symmetry between series of connected solid-state switch devices

V.Yu. Khomich, M. V. Malashin, S.I. Moshkunov, and S.V.Nebogatkin

Institute of Electrophysics and Electroenergetics
18 Dvortsovaya embankment, St. Petersburg, 191186, Russia
E-mail: khomich@ras.ru; m_malashin@mail.ru

The results of experimental investigation of static voltage distribution between series connected transistors in complex IGBT-switch is presented. The stability of the series connected transistors assembly was shown. Safe operating area of the assembly of series connected transistors is mathematically validated.

PACS: 84.70.+p

Keywords: transistors, seriesconnection, voltage distribution.

Bibliography — 13 references

Received November 15, 2013