

УДК 621-314

DOI: 10.24160/1993-6982-2018-1-47-52

Влияние параметров внутренних элементов структуры на выходную вольт-амперную характеристику мощного составного транзистора

П.А. Воронин, И.П. Воронин, П.А. Рашитов

Исследована выходная вольт-амперная характеристика мощного составного СИТ (статического индукционного транзистора) — МОП-транзистора (типа металл–оксид–полупроводник). Основная коммутируемая мощность составного ключа сосредоточена в высоковольтном СИТ, к которому последовательно подключена силовая сборка, состоящая из двух низковольтных МОП-транзисторов, являющихся противофазными элементами управления. Первый МОП-транзистор (МОП1) расположен в контуре силового тока и по цепи затвора управляет выходным током составного ключа. Вторым (МОП2) — подключен к затвору СИТ и служит для сброса остаточного тока при запираии составного ключа и его защиты от тепловой и токовой перегрузок. Установлено, что выходная ВАХ (вольт-амперная характеристика) содержит три основных участка, характеристики и параметры которых определяются режимами работы основных составляющих элементов комбинированной схемы. Первые два участка могут быть отнесены к классическим областям насыщения ключа и его активного режима работы. Третий участок характеризуется «подскоком» выходного тока ключа, что не характерно для классических вариантов ВАХ «пентодного» типа. Для объяснения особенностей выходных ВАХ составного ключа проведены дополнительные исследования. В структуру комбинированной схемы были встроены три датчика тока, позволивших контролировать ток стока СИТ, а также токи стока транзисторов управляющей сборки МОП1 и МОП2. При одинаковом управляющем напряжении в цепи затвора МОП1 были сняты выходная характеристика собственно составного ключа и три дополнительных ВАХ, выходные токи которых контролировались встроенными датчиками. Показано, что с помощью выходной ВАХ можно определять усилительные параметры внутренних элементов СИТ, что позволяет контролировать работу мощного составного ключа в режимах токовой и тепловой перегрузки, а также минимизировать мощность статических потерь в его структуре.

Ключевые слова: транзистор, индукционный тиристор, составной ключ, ток стока, затвор.

Для цитирования: Воронин П.А., Воронин И.П., Рашитов П.А. Влияние параметров внутренних элементов структуры на выходную вольт-амперную характеристику мощного составного транзистора // Вестник МЭИ. 2018. № 1. С. 47—52. DOI: 10.24160/1993-6982-2018-1-47-52.

Dependence of the High-Power Composite Transistor's Output Current-Voltage Characteristic on the Parameters of the Device Structure Internal Elements

P.A. Voronin, I.P. Voronin, P.A. Rashitov

The output current–voltage characteristic of a high-power composite static induction MOSFET transistor (SIT) is investigated. The main switching power of the composite switch is concentrated in the high-voltage SIT which is connected in series with a power assembly consisting of two low-voltage MOSFETs serving as opposite-phase control elements. The first MOSFET (MOSFET1) is located in the power current circuit and controls the composite switch output current through the gate circuit. The second MOSFET (MOSFET2) is connected to the SIT gate and serves to decrease the residual current when the composite switch is closed and to protect it from thermal and current overloads. It is found that the output current-voltage characteristic contains three main sections, the characteristics and parameters of which are determined by the operation modes of the combined circuit's main constituent elements. The first two sections can be attributed to the classical switch saturation zone and to the zone of its active mode of operation. The third section is characterized by a "jump" of the switch output current which is not typical for the classical versions of the pentode-type current-voltage characteristic. Additional investigations were carried out to explain the specific features of the composite switch output current–voltage characteristic. Three current sensors were embedded into the composite circuit structure for the possibility to measure the SIT drain current, as well as the drain currents of the control assembly's MOSFET1 and MOSFET2. The output characteristic of the composite switch itself and three additional current-voltage characteristics of the circuits with embedded current sensors were taken at the same control voltage applied to the MOSFET1 gate circuit. It has been shown that the output current-voltage characteristic can be used for determining the amplifying parameters of the SIT's internal elements, a feature that opens the possibility to monitor the operation of a high-power composite switch in the current and thermal overloading modes and also to minimize static power losses in its structure.

Key words: transistor, induction transistor, composite switch, drain current, gate.

For citation: Voronin P.A., Voronin I.P., Rashitov P.A. Dependence of the High-Power Composite Transistor's Output Current-Voltage Characteristic on the Parameters of the Device Structure Internal Elements. MPEI Vestnik. 2018;1:47—52. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2018-1-47-52.

Постановка задачи

Сравнение эффективности различных типов полупроводниковых приборов проводят на основе оценки суммарных потерь мощности, приходящихся на единицу площади кристалла, при условии, что приборы имеют одинаковые максимально допустимое напряжение и плотность тока. Суммарные потери складываются из потерь в проводящем состоянии (статических потерь) и коммутационных потерь (динамических потерь). По указанной методике одним из самых перспективных приборов для применения в силовой электронике является статический индукционный тиристор (СИТ), называемый также тиристором с электростатическим управлением (ТЭУ). Однако, данный прибор имеет существенный недостаток, ограничивающий его применение в силовых схемах [1]. Проблема связана с тем, что СИТ является нормально открытым прибором и для обеспечения его блокирующих свойств в цепи затвора требуется непрерывно поддерживать смещение отрицательной полярности. При этом даже кратковременное снятие отрицательного смещения, вызванное какими-либо обстоятельствами, ведет к развитию аварийной ситуации в силовой схеме. Для решения данной проблемы используется комбинированная или составная схема [2], представляющая собой последовательное соединение собственно СИТ и низковольтной МОП-структуры, обеспечивающей управление и защиту по цепи изолированного затвора (рис. 1).

Комбинированный СИТ – МОП-прибор является нормально закрытым устройством и обладает выходной вольт-амперной характеристикой (ВАХ) «пентодного» типа, что свойственно практически любому типу современных силовых транзисторов. Выходная характеристика комбинированной схемы обладает целым рядом свойств, отличающих ее от других силовых приборов. Для грамотного управления новым прибором и обеспечения его защиты от токовой и тепловой перегрузок необходимо провести ряд дополнительных исследований, позволяющих объяснить специфику выходной ВАХ комбинированного ключа на ее главных участках.

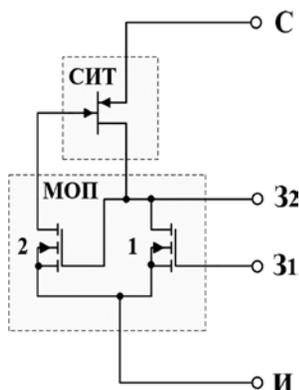


Рис. 1. Мощный составной СИТ – МОП транзистор

Выходная вольт-амперная характеристика статического индукционного тиристора

Статический индукционный тиристор представляет собой мощный полевой ключ с управляющим $p-n$ -переходом. Отличительная особенность мощного ключа заключается в наличии очень короткого канала проводимости. Насыщение тока стока для большинства обычных полевых ключей с управляющим $p-n$ -переходом происходит из-за воздействия на цепь управления прибора отрицательной обратной связи через сопротивление канала. Поскольку СИТ имеет очень короткий канал, его выходные характеристики не имеют области насыщения тока стока. Подобно триоду ограничение тока стока СИТ осуществляется пространственным зарядом. В этом смысле СИТ зачастую называют «твердотельной лампой», а его выходные ВАХ имеют форму характеристик «триодного» типа. Для структуры СИТ, называемой тиристором, характерна мощная инжекция неосновных носителей из подложки дырочного типа проводимости. В классическом смысле статический индукционный тиристор правильнее называть индукционным транзистором с модулируемой проводимостью, поскольку в процессе его переключения отсутствует эффект регенерации [3, 4].

На рис. 2 представлено экспериментальное семейство «триодных» выходных ВАХ СИТ как отдельного прибора. Параметром характеристик является напряжение в цепи затвора СИТ.

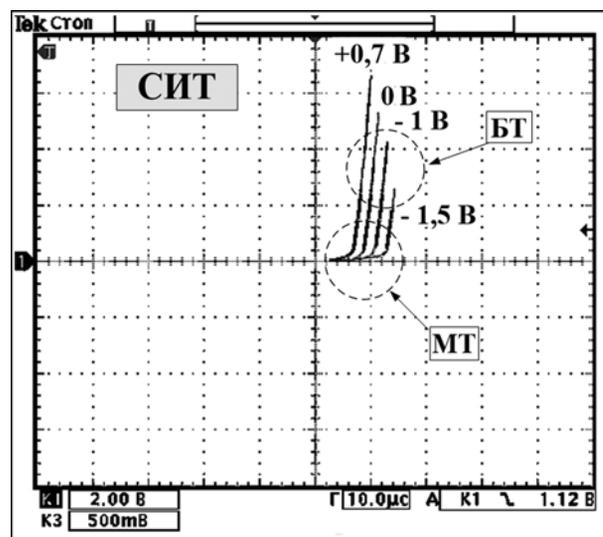


Рис. 2. Семейство выходных вольт-амперных характеристик СИТ (масштаб по осям: X — 2 В/дел., Y — 50 А/дел.)

Максимальное насыщение прибора по напряжению достигается при подаче в цепь затвора небольшого положительного смещения, не превышающего граничной величины 0,6...0,7 В для входного $p-n$ -перехода СИТ. При увеличении отрицательного смещения в цепи затвора объемный заряд $p-n$ -перехода ограничивает ток

стока в канале прибора до его полной отсечки. Величина напряжения отсечки $U_{отс}$ зависит от выходного напряжения сток–исток $U_{си}$ и блокирующей способности СИТ, характеризующейся параметром, называемым коэффициентом запираения или блокирования μ [4, 5]:

$$U_{отс} = U_{си} / \mu. \quad (1)$$

Коэффициент запираения по напряжению μ является интегральным параметром, и его следует отличать от дифференциального параметра μ^* , внутреннего коэффициента усиления СИТ по напряжению

$$\mu^* = \Delta U_{си} / \Delta U_{зи}, \quad (2)$$

где $\Delta U_{си}$, $\Delta U_{зи}$ — приращения выходного напряжения сток–исток и входного напряжения затвор–исток СИТ.

Выходные ВАХ СИТ в области малых токов (МТ на рис. 2) можно представить уравнением, описывающим закон изменения тока стока прибора I_c через потенциальный барьер $\Delta\phi$, образованный взаимодействием электростатических полей стока $U_{си}$ и затвора $U_{зи}$ [4]:

$$\Delta\phi = \eta (|U_{зи}| - U_{си} / \mu^*);$$

$$I_c = I_0 \exp\left(-\frac{\Delta\phi}{\phi_T}\right),$$

где η — коэффициент пропорциональности, зависящий от геометрии структуры СИТ; I_0 — масштабный ток, зависящий от геометрии структуры СИТ и профиля примесей в базовом слое; ϕ_T — тепловой потенциал.

В области больших токов (БТ на рис. 2) следует учитывать конечные значения омических сопротивлений стока R_c и истока $R_{и}$ СИТ, влияние которых приводит к спрямлению выходных ВАХ прибора [4]:

$$I_c = \frac{U_{си}}{(1 + \mu^*)R_{и} + R_c} - \frac{\mu^* |U_{зи}|}{(1 + \mu^*)R_{и} + R_c}.$$

Представленные выходные ВАХ СИТ показывают, что данный ключ относится к типу так называемых нормально открытых приборов, т. е. способных проводить ток при нулевом потенциале в цепи управления. С точки зрения безопасности, это является главной причиной ограниченного применения СИТ в области силовой электроники.

Выходная вольт-амперная характеристика составного ключа

Для решения проблемы предлагается использовать комбинированный или составной ключ (см. рис. 1). Основная коммутируемая мощность составного ключа сосредоточена в высоковольтном СИТ, к которому последовательно подключена силовая сборка, состоящая из двух низковольтных МОП-транзисторов, являющихся противофазными элементами управления. Первый МОП-транзистор (МОП1) расположен в контуре

силового тока и по цепи затвора управляет выходным током составного ключа. Второй (МОП2) подключен к затвору СИТ и предназначен для сброса остаточного тока при запираии составного ключа и его защиты от тепловой и токовой перегрузки [2, 4].

Составной ключ по схеме рис. 1 является нормально закрытым прибором, что соответствует требованиям безопасности и надежности для его применения в мощных преобразователях.

Семейство экспериментальных выходных ВАХ составного ключа приведено на рис. 3.

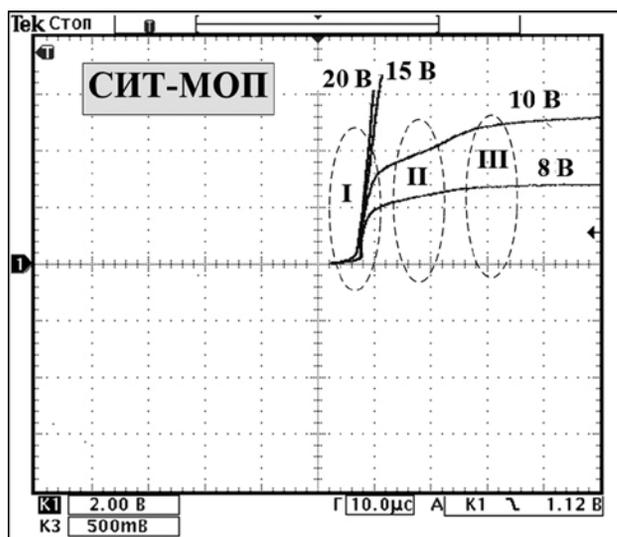


Рис. 3. Семейство выходных вольт-амперных характеристик СИТ – МОП-транзистора (масштаб по осям: X — 2 В/дел., Y — 50А/дел.)

Управление выходным током стока комбинированной схемы осуществляется положительным напряжением на изолированном затворе (вывод 31) транзистора МОП1.

Как и основные типы силовых транзисторов, применяемых в силовой электронике, выходные ВАХ составного ключа могут быть отнесены к «пентодному» типу характеристик, однако они имеют ряд отличительных признаков. На выходных ВАХ рис. 3 выделяются три характерных участка. Первые два могут быть отнесены к классическим областям насыщения ключа и его активного режима работы, соответственно, третий — характеризуется «подскоком» выходного тока ключа, что не характерно для классических вариантов «пентодных» ВАХ.

Для объяснения особенностей выходных ВАХ составного ключа были проведены дополнительные исследования. В структуру комбинированной схемы встроили три датчика тока, позволяющих контролировать ток стока СИТ, а также токи стока транзисторов управляющей сборки МОП1 и МОП2. При одинаковом управляющем напряжении в цепи затвора МОП1 были сняты выходная характеристика собственно составного ключа и три дополнительных ВАХ: мощного СИТ, управляющего транзистора МОП1 и внутреннего PNP-транзистора в структуре СИТ. Поскольку СИТ и управляющий транзистор

МОП1 имеют очень высокую крутизну передачи тока, напряжение управления в цепи затвора СИТ было снижено до 10 В, что позволило обеспечить выход на все три участка выходной ВАХ комбинированной схемы.

При активации внутреннего PNP-транзистора в структуре СИТ в цепи затвора СИТ и стока транзистора МОП2 появляется импульс тока. Это позволяет контролировать величину тока коллектора внутреннего PNP-транзистора с помощью датчика, расположенного в цепи стока транзистора МОП2. При этом выходное напряжение внутреннего PNP-транзистора соответствует выходному напряжению составного ключа. Таким образом, дополнительные характеристики на рис. 4, 5 представляют собой выходные ВАХ СИТ и управляющего транзистора МОП1, а характеристика, показанная на рис. 6, является выходной ВАХ внутреннего PNP-транзистора.

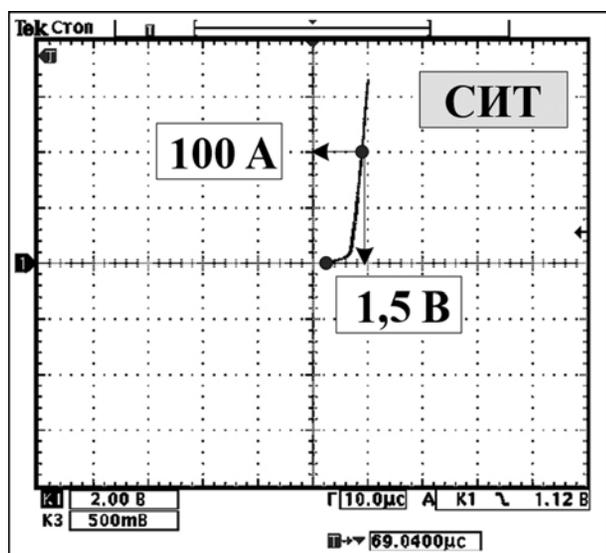


Рис. 4. Выходная вольт-амперная характеристика СИТ (масштаб по осям: X — 2 В/дел., Y — 50 А/дел.)

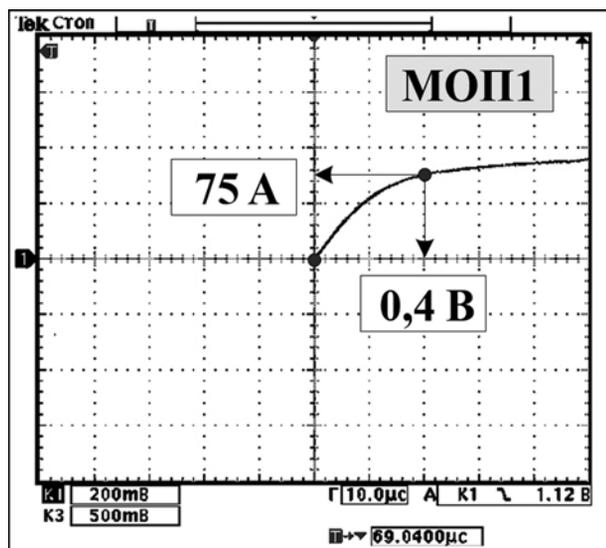


Рис. 5. Выходная вольт-амперная характеристика управляющего транзистора МОП1 (масштаб по осям: X — 0,2 В/дел., Y — 50 А/дел.)

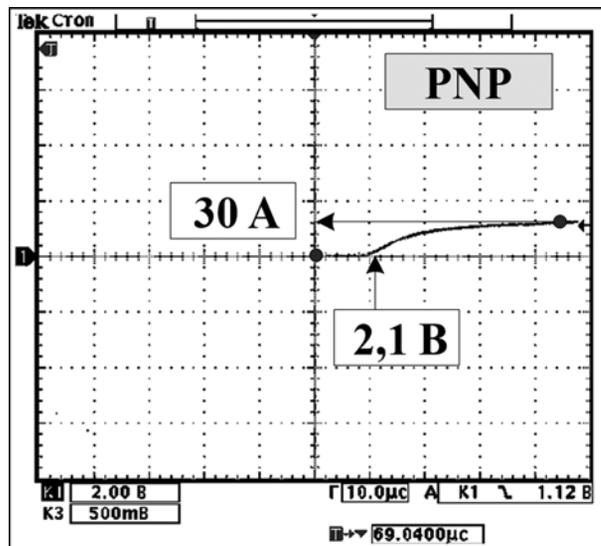


Рис. 6. Выходная вольт-амперная характеристика внутреннего PNP-транзистора (масштаб по осям: X — 2В/дел., Y — 50А/дел.)

Покажем, каким образом три основных участка выходной ВАХ комбинированной схемы (рис. 7) формируются с помощью выходных ВАХ ее основных составных элементов.

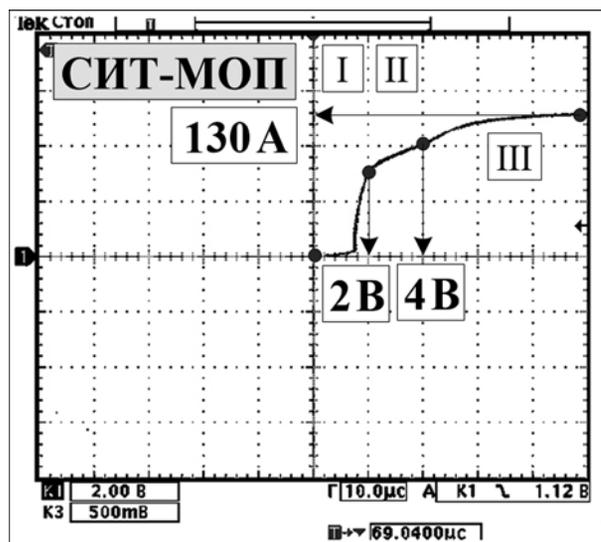


Рис. 7. Выходная вольт-амперная характеристика СИТ — МОП-транзистора (масштаб по осям: X — 2В/дел., Y — 50А/дел.)

Участок I. СИТ и транзистор МОП1 находятся в режиме насыщения, а транзистор МОП2 в режиме отсечки. Выходная ВАХ комбинированной схемы на участке I состоит из ВАХ последовательно соединенных СИТ и транзистора МОП1 на участках насыщения. При этом напряжения насыщенных приборов суммируются при заданном выходном токе, который задается током нагрузки I_n . Прямое падение напряжения $U_{нас}$ на полно-

стью открытым комбинированном ключе на участке I , который является областью его насыщения, определяется по формуле [6]:

$$U_{\text{нас}} = 2\varphi_T \ln\left(\frac{I_n}{I_S}\right) + 1,5\varphi_T \exp\left(\frac{W_{n-}}{2L}\right) + R_{\text{ON1}} I_n,$$

где I_S — ток насыщения p - n -переходов СИТ; W_{n-} — ширина базового слоя СИТ; L — диффузионная длина носителей заряда; R_{ON1} — сопротивление открытого канала транзистора МОП1.

При типовых параметрах СИТ, рассчитанного на максимальное выходное напряжение 1200 В и средний ток стока 100 А ($I_S = 7,0 \cdot 10^{-14}$ А; $W_{n-} \approx 100$ мкм; $L \approx 20$ мкм), и сопротивлении открытого канала низковольтного транзистора МОП1 $R_{\text{ON1}} \approx 5,0$ мОм прямое падение напряжения на комбинированном ключе составит $U_{\text{нас}} = 1,5 \dots 1,9$ В.

Участок II. При увеличении тока нагрузки до значения тока насыщения транзистор МОП1 переходит в активный режим, при этом СИТ остается в состоянии насыщения по напряжению. Транзистор МОП2 по-прежнему находится в режиме отсечки.

В результате с ростом напряжения в выходной цепи комбинированной схемы напряжение на транзисторе МОП1 также нарастает при ограничении тока стока I_{c1} на уровне

$$I_{\text{c1}} = S_1(U_{\text{зш1}} - V_{01}),$$

где S_1 , $U_{\text{зш1}}$, V_{01} — крутизна, амплитуда напряжения управления в цепи затвор – исток и пороговое напряжение транзистора МОП1.

При этом растет входное и выходное напряжения на запертом транзисторе МОП2 при нулевом значении тока стока прибора I_{c2} .

Таким образом, выходная ВАХ комбинированной схемы на участке II определяется формулой (2), описывающей выходную ВАХ транзистора МОП1 в активном режиме.

Для типовых значений параметров $S_1 = 10 \dots 15$ А/В; $U_{\text{зш1}} = 10$ В; $V_{01} = 3$ В ток насыщения транзистора МОП1 составит $I_{\text{c1}} \approx 75 \dots 100$ А.

Участок III. Как только выходное напряжение в цепи стока транзистора МОП1 достигает порогового напряжения отпирания $V_{02} \approx 2,1$ В транзистора МОП2, затвор СИТ через открытый индуцированный канал МОП2 подключается к общей шине и фиксирует свой потенциал на нулевом уровне. При дальнейшем росте напряжения на стоке МОП1 внутренний биполярный PNP-транзистор в структуре СИТ переходит в активный режим, при этом в базовой области СИТ начинается интенсивный захват дырочной составляющей тока нагрузки $I_{\text{нр}}$, которая по цепи затвора СИТ выводится через открытый канал транзистора МОП2 на общую шину [6]

$$I_{\text{c2}} = I_{\text{нр}} = \alpha_{\text{PNP}} I_{\text{н}}, \quad (3)$$

где I_{c2} — ток стока транзистора МОП2; α_{PNP} — коэффициент передачи тока биполярного PNP транзистора в структуре СИТ.

С целью поддержания на относительно высоком уровне избыточного заряда на границах базовой области СИТ, необходимого для максимального насыщения прибора по напряжению, усилительные свойства PNP-транзистора существенно ограничивают [7, 8], при этом величина коэффициента передачи тока для PNP-транзистора, как правило, не превышает значения $\alpha_{\text{PNP}} \approx 0,2 \dots 0,25$.

Дырочная составляющая тока нагрузки при заданных значениях коэффициента передачи α_{PNP} и тока насыщения I_{c1} транзистора МОП1 может быть определена как

$$I_{\text{нр}} = \frac{\alpha_{\text{PNP}}}{1 - \alpha_{\text{PNP}}} I_{\text{c1}}.$$

При максимальном токе транзистора МОП1 $I_{\text{c1}} \approx 100$ А дырочная составляющая тока нагрузки не превышает величины $I_{\text{нр}} \approx 30$ А.

Выходная ВАХ комбинированной схемы на участке III имеет характеристику источника тока $I_{\text{комб}}$ и состоит из ВАХ, находящихся в активных режимах PNP-транзистора в структуре СИТ и транзистора МОП1. Выходные токи указанных элементов суммируются при заданном выходном напряжении

$$I_{\text{комб}} = I_{\text{c1}} + I_{\text{нр}} = \frac{1}{1 - \alpha_{\text{PNP}}} I_{\text{c1}}.$$

Следует отметить, что относительно высокое выходное напряжение комбинированной схемы приложено в основном к СИТ, а внутри его структуры — к цепи коллектор – эмиттер встроенного PNP-транзистора, поскольку максимальное выходное напряжение на управляющем транзисторе МОП1 ограничено на уровне напряжения отсечки в соответствии с формулой (1).

Анализ полученных экспериментальных данных позволяет сделать следующие основные выводы.

1. Выходная ВАХ составного ключа формируется на основе комбинации выходных характеристик главных составляющих элементов схемы: высоковольтного СИТ, низковольтного управляющего транзистора МОП1 и внутреннего PNP-транзистора в структуре СИТ.

2. При «классическом» уровне напряжения управления во входной цепи составного ключа 15 В комбинированная схема, благодаря высокой крутизне СИТ и МОП1, остается в режиме глубокого насыщения даже при трехкратном токе перегрузки, при этом прямое напряжение на открытом ключе не превышает 2 В.

3. С помощью выходной ВАХ составного ключа (участок III) экспериментально определяется амплитуда тока коллектора внутреннего PNP-транзистора в структуре СИТ, что позволяет с помощью (3) рассчитать его усилительные свойства при заданном токе нагрузки. Если коэффициент передачи $\alpha_{\text{PNP}} \leq 0,25$, в базовой области СИТ происходит наиболее эффективное накопление заряда носителей и минимизация статических потерь мощности.

4. Снижение амплитуды напряжения управления в цепи затвора МОП1 позволяет уменьшить уровень максимально возможного выходного тока составного ключа, что обеспечивает его защиту при токовой перегрузке.

5. При выходе на участок III активного режима в цепи затвора СИТ и в стоковой цепи транзистора МОП2 образуется импульс тока, создаваемый дырочной компонентой тока нагрузки, при этом увеличивается уровень напряжения в цепи затвора транзистора МОП2 (вывод 32). Данные информационные сигналы могут быть использованы для контроля за токовой и тепловой перегрузками, а также за перегрузкой по напряжению составного ключа, которые являются основными факторами перехода составного транзистора на участок III выходной ВАХ.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 16-07-00355).

Литература

1. Nishizava J., Terasaki T., Shibata J. Field – Effect Transistor Versus Analog Transistor (Static Induction Transistor) // IEEE Trans. on Electron Dev. 1975. V. 22. No. 4. Pp. 185—197.

2. Воронин П.А., Воронин И.П., Панфилов Д.И., Духнич Е.М. Оптимизация статических и динамических параметров мощного составного ключа с полевым управлением // Известия РАН. Энергетика. 2016. № 4. С. 91—102.

3. Горбатюк А.В., Гусин Д.В., Иванов Б.В. Теория и моделирование комбинированных механизмов ограничения области безопасной работы полупроводниковых переключателей силовой микроэлектроники // Физика и техника полупроводников. 2013. Т. 47. № 3. С. 373—382.

4. Воронин П.А. Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применение. М.: ДМК Пресс, 2015.

5. Бономорский О.И., Кюрегян А.С., Горбатюк А.В., Иванов Б.В. Сравнительный анализ статических характеристик биполярных транзисторов с изолированным затвором и тиристоров с полевым управлением // Электротехника. 2015. № 2. С. 51—56.

6. Rozanov Y., Ryvkin S., Chaplygin E., Voronin P. Power Electronic Basics: Operating, Principles, Design, Formulas and Applications. Taylor & Francis Group, CRC Press, 2015.

7. Кюрегян А.С., Юрков С.Н. Подпороговые характеристики транзисторов и тиристоров с электростатическим управлением. Ч. I. Мелкий планарный затвор // Физика и техника полупроводников. 1998. Т. 32. № 2. С. 249—254.

8. Кюрегян А.С. Подпороговые характеристики транзисторов и тиристоров с электростатическим управлением. Ч. II. Глубокий планарный затвор // Физика и техника полупроводников. 1998. Т. 32. № 4. С. 497—503.

References

1. Nishizava J., Terasaki T., Shibata J. Field – Effect Transistor Versus Analog Transistor (Static Induction Transistor). IEEE Trans. on Electron Dev. 1975;22;4:185—197.

2. Voronin P.A., Voronin I.P., Panfilov D.I., Duhnich E.M. Optimizatsiya Staticheskih i Dinamicheskikh Parametrov Moshchnogo Sostavnogo Klyucha s Polevym Upravleniem. Izvestiya RAN. Energetika. 2016;4:91—102. (in Russian).

3. Gorbatyuk A.V., Gusin D.V., Ivanov B.V. Teoriya i Modelirovanie Kombinirovannyh Mekhanizmov Ogranicheniya Oblasti Bezopasnoy Raboty Poluprovodnikovyh Pereklyuchateley Silovoy Mikroelektroniki. Fizika i Tekhnika Poluprovodnikov. 2013;47;3:373—382. (in Russian).

4. Voronin P.A. Silovye Poluprovodnikovye Klyuchi: Semeystva, Harakteristiki, Primenenie. M.: DMK Press, 2015. (in Russian).

5. Bonomorskiy O.I., Kyuregyan A.S., Gorbatyuk A.V., Ivanov B.V. Sravnitel'nyy Analiz Staticheskih Harakteristik Bipolyarnykh Tranzistorov s Izolirovannym Zatvorom i Tiristorov s Polevym Upravleniem. Elektrotehnika. 2015;2:51—56. (in Russian).

6. Rozanov Y., Ryvkin S., Chaplygin E., Voronin P. Power Electronic Basics: Operating, Principles, Design, Formulas and Applications. Taylor & Francis Group, CRC Press, 2015.

7. Kyuregyan A.S., Yurkov S.N. Podporogovye Harakteristiki Tranzistorov i Tiristorov s Elektrostaticheskim Upravleniem. Ch. I. Melkiy Planarnyy Zatvor. Fizika i Tekhnika Poluprovodnikov. 1998;32;2:249—254. (in Russian).

8. Kyuregyan A.S. Podporogovye Harakteristiki Tranzistorov i Tiristorov s Elektrostaticheskim Upravleniem. Ch. II. Glubokiy Planarnyy Zatvor. Fizika i Tekhnika Poluprovodnikov. 1998;32;4:497—503. (in Russian).

Сведения об авторах

Воронин Павел Анатольевич — кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной электроники НИУ «МЭИ», e-mail: voroninpa@list.ru

Воронин Игорь Павлович — кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной электроники НИУ «МЭИ», e-mail: phd.voronin@gmail.com

Рашитов Павел Ахматович — кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной электроники НИУ «МЭИ», e-mail: rashitov333@mail.ru

Information about authors

Voronin Pavel A. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Industrial Electronics Dept., NRU MPEI, e-mail: voroninpa@list.ru

Voronin Igor P. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Industrial Electronics Dept., NRU MPEI, e-mail: phd.voronin@gmail.com

Rashitov Pavel A. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Industrial Electronics Dept., NRU MPEI, e-mail: rashitov333@mail.ru

Статья поступила в редакцию 20.03.2017