

**В. Н. Иванюков**, канд. техн. наук

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры,  
г. Макеевка

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ АКТИВНО-ЕМКОСТНОЙ НАГРУЗКИ ИСКРОЗАЩИТНЫМИ УСТРОЙСТВАМИ НА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ТРАНЗИСТОРАХ

*Исследовано влияние характера активно-емкостной нагрузки полупроводниковых транзисторов в переходных режимах работы для обеспечения искробезопасности электрической цепи. Определен порядок выбора параметров полупроводниковых транзисторов в схемах искрозащиты активно-емкостной нагрузки, а также установлена необходимость строгого контроля зависимостей между параметрами полупроводниковых транзисторов.*

**Ключевые слова:** искробезопасность, импульс, транзистор, емкостная нагрузка

### Введение

Добыча полезных ископаемых, содержащих углеводороды или другие вещества, способные к воспламенению и взрыву, а также эксплуатация различных видов электрооборудования в условиях возможного возникновения взрывоопасной атмосферы (предприятия химической, нефтеперерабатывающей промышленности, различные складские помещения и территории хранения взрывоопасных веществ и т. д.), требуют применения взрывозащищенного электрооборудования.

Методы и средства обеспечения безопасности взрывозащищенного электрооборудования с видами защиты «взрывонепроницаемая оболочка», «масляное заполнение оболочки» или «кварцевое заполнение оболочки», «защита повышенным давлением», «герметизация» и другие специальные виды взрывозащиты предназначены для исключения передачи взрыва в нормальном и аварийном режиме работы из оболочки в окружающее ее пространство. Эти виды взрывозащиты применяются в основном для электрооборудования, содержащего высоковольтные и сильнотоочные цепи.

Вид взрывозащиты «искробезопасная электрическая цепь» широко применяется в устройствах связи, сигнализации, контроля и дистанционного управления, применяемых, например, в шахтах, опасных по газу и/или пыли. В электрооборудовании с видом взрывозащиты «искробезопасная электрическая цепь» электрические параметры цепей ограничены на таком уровне, при котором мощность коммутационных разрядов снижается до величины, не приводящей к воспламенению окружающей взрывчатой атмосферы как в нормальных, так и в аварийных режимах. Такое электрооборудование разрешается эксплуатировать без ограничения во всех выработках угольных шахт или в любом месте на предприятиях химической или нефтеперерабатывающей промышленности.

Искробезопасная мощность цепи в общем случае определяется выражением [1, 2]:

$$P_u = \frac{A_{\min} + A_{\text{ном}} - \frac{LI_0^2}{2} + \frac{CU_0^2}{2}}{k_{\text{ис}} t}, \text{ Вт}, \quad (1)$$

где  $A_{\min}$  – минимальная воспламеняющая энергия для данной смеси, Дж;

$A_{\text{ном}}$  – энергия потерь на электродах, Дж;

$L, C$  – индуктивность цепи, Гн, и электрическая емкость цепи, Ф;

$I_0, U_0$  – ток А и напряжение В в момент коммутации;

$t$  – длительность разряда, с;  
 $k_{уб}$  – коэффициент искробезопасности, ед.

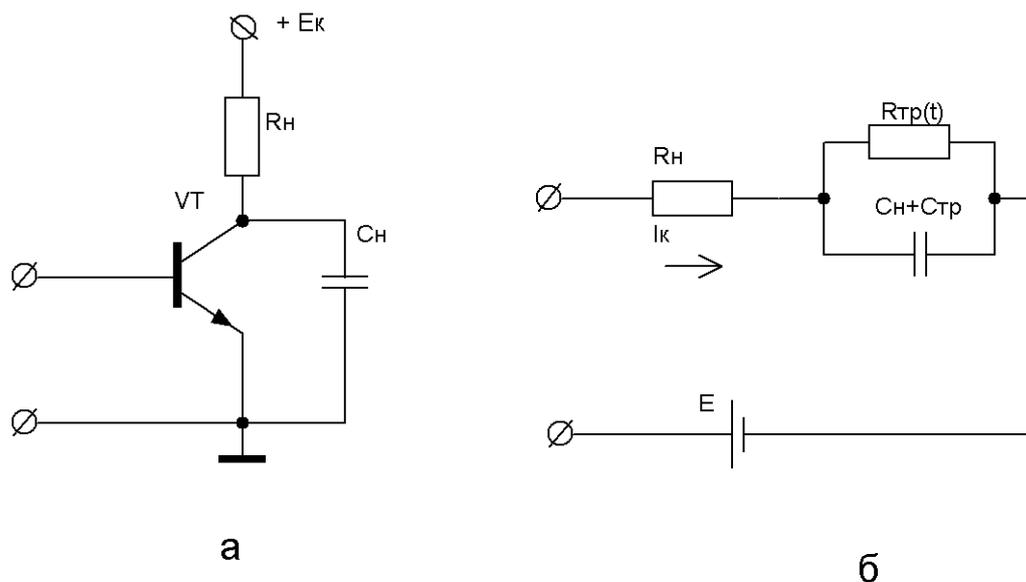
В электрооборудовании с видом взрывозащиты «искробезопасная электрическая цепь» наиболее широко распространены способы и средства искрозащиты на полупроводниковых транзисторах, основанные на принципе сокращения длительности коммутационного разряда, т. е. использовании ключевого режима работы транзистора.

Накопленный опыт конструирования устройств искрозащиты на транзисторах до настоящего времени базируется на требованиях ГОСТ 22782.5 [3] к искрозащитным элементам, в котором вводятся ограничения для этих элементов только по нагрузке в  $2/3$  по максимально допустимым току, напряжению и рассеиваемой мощности без учета возможных изменений их в процессе работы транзистора.

**Целью** статьи является представление данных исследования искробезопасного режима работы полупроводникового транзистора с учетом влияния активно-емкостной нагрузки транзисторного ключа.

### Основная часть исследования

Упрощенная принципиальная (а) и эквивалентная (б) схемы транзисторного ключа при подключении к нему активно-емкостной нагрузки показаны на рисунке 1, а статические и динамические характеристики показаны на рисунке 2 [5].



VT – транзистор;  $R_n$  – сопротивление нагрузки;  $C_n$  – емкость нагрузки;  
 $E_K$  – источник питания транзисторного ключа;  $I_K$  – ток коллектора транзистора;  
 $R_{mp}(t)$  – сопротивление транзистора во время его работы;  
 $C_{mp}$  – емкость переходов транзистора

Рисунок 1 – Принципиальная (а) и эквивалентная (б) схемы транзисторного ключа при подключении к нему активно-емкостной нагрузки

При работе транзистора на активно-емкостную нагрузку необходимо учитывать три случая отпирания базы [4]:

- переход рабочей точки в область насыщения

$$\left( I_B h_{21} > \frac{E}{R_n} \right);$$

– переход рабочей точки на границу области насыщения и активной области

$$\left( I_B h_{21} = \frac{E}{R_n} \right);$$

– переход рабочей точки в активную область

$$\left( I_B h_{21} < \frac{E}{R_n} \right),$$

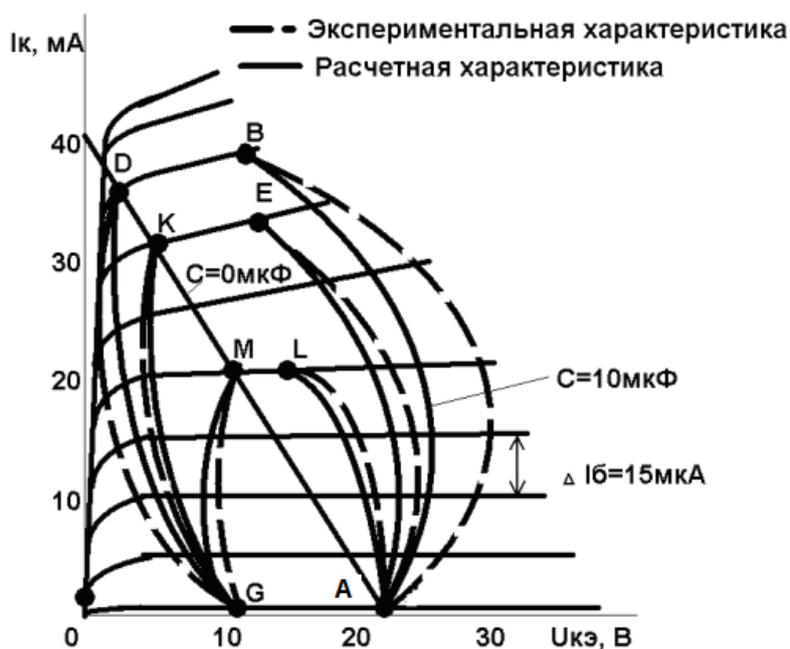
где  $I_B$  – ток базы транзистора А;

$h_{21}$  – коэффициент усиления тока, ед.;

$E$  – напряжение питания транзисторного ключа В;

$R_n$  – сопротивление нагрузки транзисторного ключа Ом.

Статические и динамические характеристики транзистора типа КТ 3102 в схеме ключа с RC-нагрузкой представлены на рисунке 2.



$U_{кэ}$  – напряжение коллектор-эмиттер В;  $I_K$  – ток коллектора А;

$C$  – электрическая емкость нагрузки транзисторного ключа Ф

Рисунок 2 – Статические и динамические характеристики транзистора в схеме ключа с RC-нагрузкой

При подаче переднего фронта отпирающего импульса рабочая точка в первом случае из точки А перемещается в точку В, во втором – в точку Е, в третьем – в точку L. Динамическая характеристика при переходе из точки А в точку В (или Е, или L) рассчитывается с использованием схемы замещения, показанной на рисунке 1б.

Напряжение коллектор-эмиттер и ток коллектора можно определить по следующим формулам [4, 5]:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{кэ} = E \cdot \exp\left(-\frac{t}{(C_n + C_{mp})R_{экв}}\right), \text{ В} \\ i_k = \frac{E}{R_{mp}(t)} \cdot \exp\left(-\frac{t}{(C_n + C_{mp})R_{экв}}\right), \text{ А} \end{array} \right. ;$$

где

$$R_{экв} = \frac{R_{mp}(t)R_n}{R_{mp}(t) + R_n}, \text{ Ом},$$

где  $R_{экв}$ ,  $R_{mp}$  – эквивалентное электрическое сопротивление и электрическое сопротивление транзисторов.

После достижения своего максимального значения ток коллектора, а с ним и напряжение коллектор-эмиттер, постепенно убывают по вольтамперной характеристике до значения тока коллектора  $i_k$ , А (точки D, K, M в зависимости от условий на входе транзистора), что показано на рисунке 2.

Исследование работы транзистора на активно-емкостную нагрузку при запираании транзистора показало, что рабочая точка перемещается вначале из положений D, K, M (в зависимости от условий на входе транзистора) в положение G, а затем возвращается в положение A [4], т. к. емкость нагрузки  $C_n$  заряжается от источника питания  $E_K$  (рисунок 1а).

Динамическая характеристика при переходе из точек D, K, M в точку G рассчитывается согласно выражениям:

$$U_{кэ} = (E - U_{кэи}) \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{(C_n + C_{mp})R_{экв}}\right)\right) + U_{кэи}, \text{ В},$$

$$i_k = \frac{U_{кэ}}{R_{mp}(t)}, \text{ А}.$$

Таким образом, используя выходную вольтамперную характеристику транзистора с нанесенными на нее областями безопасной работы и зная параметры схемы, можно построить расчетную динамическую характеристику и определить, работает ли транзистор в области безопасной и надежной работы (кривая, соединяющая точки B и A (рисунок 2), находится на границе области безопасной работы транзистора). Если динамическая характеристика пересекает где-либо границы безопасной области работы, следует изменить параметры схемы, чтобы вся динамическая характеристика укладывалась в безопасную область работы. В противном случае необходимо применить другой транзистор [6].

### **Выводы**

1. Искробезопасный режим работы полупроводниковых транзисторов, имеющих активно-емкостную нагрузку, необходимо определять на основании расчета динамических (импульсных) режимов их работы.
2. Предельно допустимые значения мощностей, напряжений и токов транзисторов в статическом режиме, регламентируемые производителем, недостаточны для определения безопасного применения транзистора в ключевом режиме работы.

### **Список литературы**

1. Петренко, В. А. Научные основы электровзрывобезопасности в горнодобывающей и нефтехимической промышленности / В. А. Петренко. – М. : Наука, 1980. – 120 с.

2. Cawley, James C. Probability of Spark Ignition in Intrinsically Safe Circuits / James C. Cawley // Bur. Mines US Dep. Inter. – 1988. – P. 1–15.
3. Электрооборудование взрывозащищенное с видом взрывозащиты «искробезопасная электрическая цепь». Технические требования и методы испытаний : ГОСТ 22782.5–78. – Введ. 1980-01-01. – М. : Изд-во стандартов, 1985. – 70 с.
4. Установить область применения и разработать методы и средства оценки полупроводниковых компонентов, используемых в качестве защитных элементов искробезопасных цепей взрывозащищенного электрооборудования : отчет о НИР (заключительный) / Государственный Макеевский НИИ по безопасности работ в горной промышленности ; № ГР UF01003255Р. – Макеевка : Донбасс, 1994.
5. Николаевский, И. Ф. Параметры и предельные режимы работы транзисторов / И. Ф. Николаевский, Д. В. Игумнов. – М. : Сов. радио, 1981. – 154 с.
6. Тугов, Н. М. Полупроводниковые приборы / Н. М. Тугов, Б. А. Глебов, Н. А. Чарыков. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 576 с.

**В. Н. Иванюков**

***Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, г. Макеевка***  
**Обеспечение безопасности активно-емкостной нагрузки искрозащитными устройствами**  
**на полупроводниковых транзисторах**

Исследовано влияние характера активно-емкостной нагрузки полупроводниковых транзисторов в переходных режимах работы для обеспечения искробезопасности электрической цепи.

Вид взрывозащиты «искробезопасная электрическая цепь» широко применяется в устройствах связи, сигнализации, контроля и дистанционного управления, применяемых, например, в шахтах, опасных по газу и/или пыли. В электрооборудовании с видом взрывозащиты «искробезопасная электрическая цепь» электрические параметры цепей ограничены на таком уровне, при котором мощность коммутационных разрядов снижается до величины, не приводящей к воспламенению окружающей взрывчатой атмосферы как в нормальных, так и аварийных режимах. Такое электрооборудование разрешается эксплуатировать без ограничения во всех выработках угольных шахт или в любом месте на предприятиях химической или нефтеперерабатывающей промышленности.

В ходе выполнения работы установлено, что для определения искробезопасного режима работы полупроводникового транзистора, имеющего активно-емкостную нагрузку, недостаточно знать предельно допустимые значения мощностей, напряжений и токов, регламентируемые производителем транзисторов для статического режима работы. Искробезопасность работы транзисторного ключа должна рассматриваться в совокупности с определением границ действия каждого максимального (минимального) параметра на всем поле входных (выходных) вольтамперных характеристик с учетом динамического (импульсного) режима его работы.

**ИСКРОБЕЗОПАСНОСТЬ, ИМПУЛЬС, ТРАНЗИСТОР, ЕМКОСТНАЯ НАГРУЗКА**

**V. N. Ivanilov**

***Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, Makeyevka***  
**Protection of Active Capacitive Load by Spark-Protecting Devices in Semiconductor Transistors**

The impact of the active capacitive load condition in semiconductor transistors during transient state of the operating mode for the spark-safe circuit is examined.

The type of the implosion protection « spark-safe circuit» is widely used in coupling devices, signalization, control and remote-control applied for example in mines dangerous in gas and/or dust. In the electrical equipment with the implosion protection « spark-safe circuit» network parameters are limited at such a level where power of switching charges drops to the value not resulting in the ignition of explosive ambience both in normal and emergency operation. This electrical equipment is permitted to operate in all mine workings without restriction or at enterprises of chemical and petroleum refining industries.

In the course of the work it is established that for the spark-safe operation of the semiconductor transistor with the active capacitive load it is not enough to know overload capacity of the power, voltage and current regulated by the producer of transistors for the static operating mode. It is necessary to consider spark-safe operation of the transistor switch in the aggregate with the delimitation of each maximum (minimum) parameter action on the entire field of input (output) voltage-current characteristics taking into account its dynamic (pulse) operating mode.

**SPARK-SAFETY, IMPULSE, TRANSISTOR, CAPACITIVE LOAD**

**Сведения об авторе:**

**В. Н. Иванюков**

SPIN-код: 8583-3775

Телефон: +38 (095) 400-13-18

*Статья поступила 15.02.2016*

© В. Н. Иванюков, 2017

*Рецензент: С. П. Высоцкий, д-р техн. наук, проф., АДИ ГОУВПО «ДонНТУ»*