

Высоковольтные тиристоры с элементами самозащиты при работе в аварийных режимах

Д. Титушкин¹, А. Сурма², Д. Носов³, И. Савин⁴

УДК 621.382 | ВАК 05.27.00

Один из механизмов формирования встроенных элементов самозащиты от перенапряжения высоковольтных полупроводниковых тиристоров – локальное протонное облучение области основного управляющего электрода. Данный способ был успешно опробован. Рассмотрим результаты применения этого решения при разработке нового высоковольтного тиристора Т483-1600-60.

Современный рынок энергетического оборудования требует применения высоконадежных технических решений и комплектующих, так как отказ силового полупроводникового прибора в условиях эксплуатации может привести к отказу всего преобразовательного оборудования, что обернется большими расходами. Применительно к высоковольтным преобразовательным установкам, в состав которых входят силовые полупроводниковые тиристоры (обычно рассчитанные на напряжение порядка 6500 В), отказ драйвера управления силовым тиристором не менее опасен. Ради сохранения безопасной работы стандартный мощный тиристор из-за отказа драйвера необходимо перевести в проводящее состояние при отсутствии внешнего сигнала управления.

В связи с этим важным направлением совершенствования конструкций высоковольтных силовых полупроводниковых тиристоров является введение в полупроводниковую структуру элемента самозащиты от перенапряжения [1–6]. Данное решение позволяет исключить отказ высоковольтного тиристора в случае несанкционированного режима работы за счет придания тиристорному элементу свойства динистора (переключение в проводящее состояние при подаче определенного значения напряжения катод-анод) [6].

Известно, что протонное облучение (имплантация атомов водорода) вводит в структуру полупроводникового прибора рекомбинационные центры, что дает возможность регулировать динамические параметры тиристоров и обычно используется для изготовления быстродействующих и быстро восстанавливающихся тиристоров и диодов [4]. Протонное облучение также индуцирует возникновение связанных с ним донорных центров, аналогичных

по свойствам традиционным донорам (фосфор, мышьяк, сурьма) [4, 7]. Локальное протонное облучение может таким образом формировать элементы самозащиты от перенапряжения, при этом с высокой точностью регулируя напряжение лавинного пробоя, что особенно актуально для применения тиристоров в последовательных сборках высоковольтных вентилях [3, 5].

Таким образом, тиристор в составе последовательной сборки может безопасно переключаться при отказе драйвера (отсутствии штатных сигналов управления), а вентиль сохраняет работоспособность при отказе драйвера одного из приборов [5].

КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ СОЗДАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ САМОЗАЩИТЫ

Предлагаемое конструктивно-технологическое решение (локальное протонное облучение) было опробовано на тиристорах с диаметром полупроводникового элемента 80 мм, рассчитанных на напряжение 2000 В, где под областью основного управляющего электрода была сформирована n -область при помощи протонного облучения.

В соответствии с программой исследования были выполнены:

- измерение основных электрических параметров, характеристик и сравнение с результатами измерений до формирования элементов самозащиты;
- испытания на безопасное переключение при малых анодных токах (до 35 А);
- испытания на безопасное переключение при анодных токах до 1250 А;
- испытания на воздействие ударным током в целях определения стабильности механизма переключения в условиях эксплуатации;
- повторные испытания на безопасное переключение при анодных токах до 1250 А.

Измерения основных электрических параметров и характеристик до формирования встроенных элементов

¹ АО «Протон-Электротекс», d.titushkin@proton-electrotex.com.

² АО «Протон-Электротекс», a.surma@proton-electrotex.com.

³ АО «Протон-Электротекс», d.nosov@proton-electrotex.com.

⁴ АО «Протон-Электротекс», i.savin@proton-electrotex.com.

самозащиты и после позволили сделать вывод, что введение в структуру тиристора локальной области, отвечающей за переключение в проводящее состояние, не ухудшает основные электрические и тепловые параметры и характеристики испытываемых приборов.

Испытания тиристорov с элементами самозащиты на безопасное переключение по аноду заключались в проверке их способности выдерживать воздействие импульсов тока значительной амплитуды при переключении под действием перенапряжений в прямом направлении. Процедура выполнялась как при разомкнутой, так и при замкнутой цепи управления и состояла из двух этапов.

На первом этапе тиристоры подвергались воздействию перенапряжения в прямом направлении от высоковольтного источника тока, который формировал при переключении испытываемого тиристора импульс тока полусинусоидальной формы длительностью 100 мкс по уровню 0,5 от амплитудного значения. Выходное напряжение холостого хода источника – не менее 6 кВ, амплитуда импульса тока – 35 А. Каждый образец подвергался воздействию пяти импульсов перенапряжения. После испытаний контролировались значения повторяющегося импульсного тока в закрытом состоянии и повторяющегося импульсно-обратного тока.

На втором этапе испытываемые образцы подвергались воздействию перенапряжений в схеме, обеспечивающей формирование после переключения тиристора импульса тока трапецеидальной формы большой амплитуды, и высокой скорости нарастания переднего фронта.

В зажимное устройство стенда устанавливались последовательно включенные испытываемый образец, цепь управления которого была замкнута либо разомкнута, и коммутирующий тиристор типа Т173-2000-34. При испытаниях использовалась формирующая линия с волновым сопротивлением 1 Ом. До подачи импульса управления коммутирующим тиристором напряжение на каждом из приборов примерно равно и составляет половину напряжения

на формирующей линии. При включении коммутирующего тиристора всё напряжение прикладывается к испытываемому устройству, и, поскольку его значение превышает напряжение переключения испытываемого тиристора, он переключается. Амплитуда тока задавалась включенными последовательно дополнительными резисторами с сопротивлением 6,7 или 0,75 Ом. Скорость нарастания тока регулировалась катушкой индуктивности, включенной последовательно с резистором. Напряжение на формирующей линии перед включением коммутирующего тиристора устанавливалось равным 2300 В. Схема подключения испытываемого тиристора к формирующей линии показана на рис. 1. Напряжение на коммутирующем приборе и на двух последовательно включенных тиристорах, коммутирующем и испытываемом, регистрировалось осциллографом TPS2024 и делителями напряжения типа Tektronix P5100. Осциллограмма напряжения на испытываемом тиристоре с самозащитой получена методом дифференциального измерения. Осциллограммы напряжения на испытываемом образце и тока через него представлены на рис. 2–6.

При сопротивлении нагрузки 6,7 Ом амплитуда тока составляла 290 А, скорость нарастания переднего фронта по уровню 0,5 была равна 75 А/мкс, длительность импульса по уровню 0,5–350 мкс. Количество воздействий на каждый образец – 300 импульсов с частотой 1 Гц.

При сопротивлении нагрузки 0,75 Ом амплитуда тока составляла 1250 А, скорость нарастания переднего фронта по уровню 0,5 равна 90 А/мкс, длительность импульса по уровню 0,5–125 мкс. Количество воздействий на каждый образец – 120 импульсов с частотой 1 Гц.

В результате тиристоры выдержали испытания на безопасное переключение, то есть на токах до 1250 А механизм самозащиты при переключении под воздействием перенапряжения сработал (см. рис. 2–6). Стойкость тиристорov к воздействию скорости нарастания тока в открытом состоянии при переключении по аноду у исследуемых

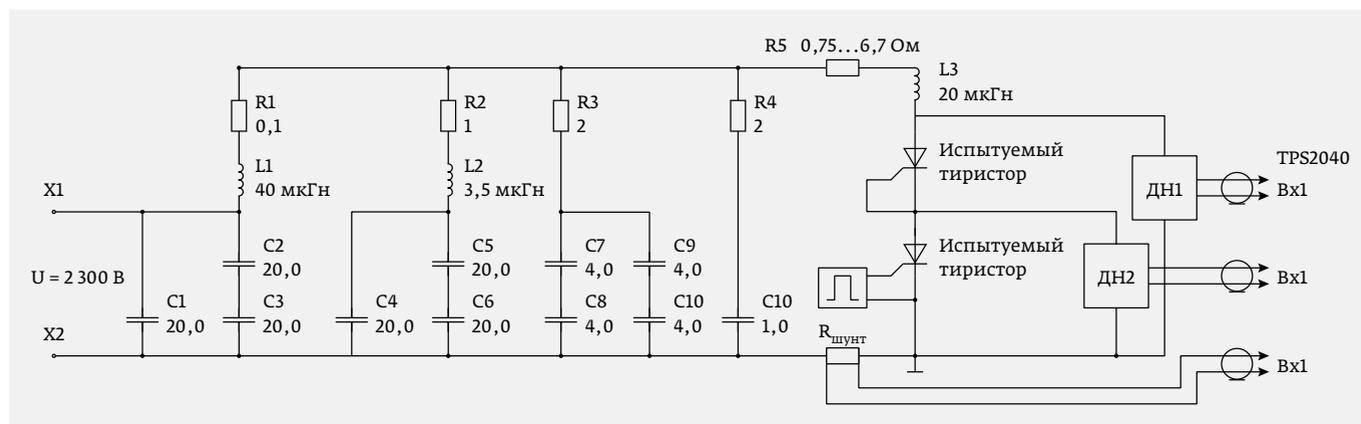


Рис. 1. Схема испытаний

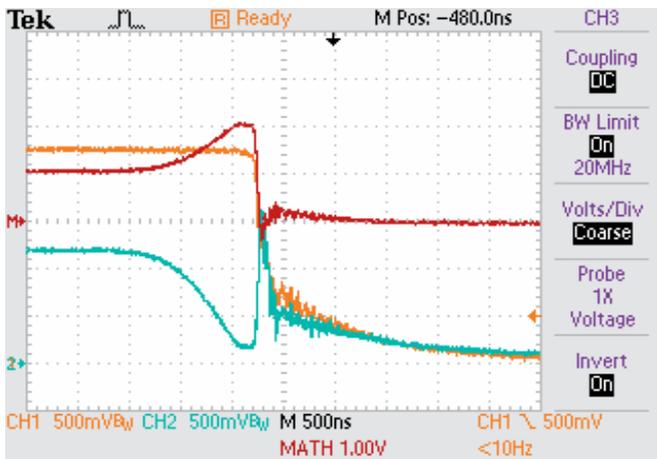


Рис. 2. Осциллограммы напряжения на двух последовательно включенных тиристорах (желтая); коммутирующем приборе (голубая); испытуемом образце с самозащитой (красная)

образцов сопоставима с типичными значениями di/dt стойкости при включении приборов по управляющему электроду.

Для проверки возможности отжига эффекта локального облучения (в аварийных режимах работы тиристора) были проведены испытания в режиме высокотемпературного хранения при температуре 125 °C в течение 168 ч и испытания на стойкость к воздействию 20 последовательных импульсов ударного тока амплитудой 40 кА при $T=125$ °C и $V_D=V_R=0$. Затем измерялись параметры – критерии годности, проводилось повторное испытание на переключение тиристора со встроенным механизмом самозащиты от воздействия перенапряжения при токе 1250 А. В результате

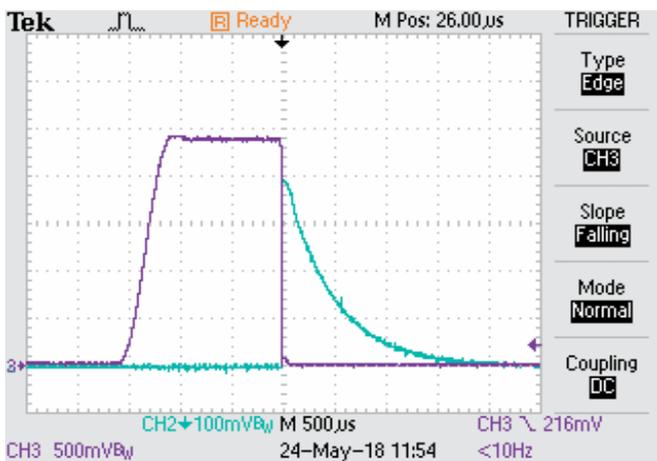


Рис. 3. Осциллограммы напряжения на двух последовательно включенных тиристорах (фиолетовая) и тока через испытуемый прибор с самозащитой (голубая) при амплитуде тока 290 А

не наблюдалось изменение значений напряжения переключения тиристорov в прямом направлении и не было обнаружено параметрических и катастрофических отказов.

НОВЫЙ ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ ТИРИСТОР СО ВСТРОЕННЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ САМОЗАЩИТЫ ОТ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ

На основании полученных результатов по формированию встроенных элементов самозащиты от перенапряжения было принято решение о разработке мощного высоковольтного тиристора T483-1600-60, который характеризуется:

- оптимизированной диффузионной структурой и применением технологии низкотемпературного спекания для снижения динамического сопротивления (r_T);
- модернизированной топологией диффузионного элемента и применением протонного облучения для получения малых (до 400 мкс) значений времени выключения тиристора;
- прецизионным регулированием значений заряда обратного восстановления (Q_{rr}) до уровня $\pm 5\%$;
- интегрированным элементом самозащиты от перенапряжения.

Интегрированный элемент самозащиты исключает необходимость применения таких технических решений, как установка внешних ограничителей напряжения (BOD), и, соответственно, устраняет необходимость доработки конструкции силового блока для применения систем защиты. Данное решение позволит снизить сложность силовой сборки и нивелировать связанные с этим риски при сопоставимом с применением внешних элементов защиты уровне затрат. Дополнительно на выходных испытаниях АО «Протон-Электротекс» планирует проверить работу интегрированной системы защиты в составе

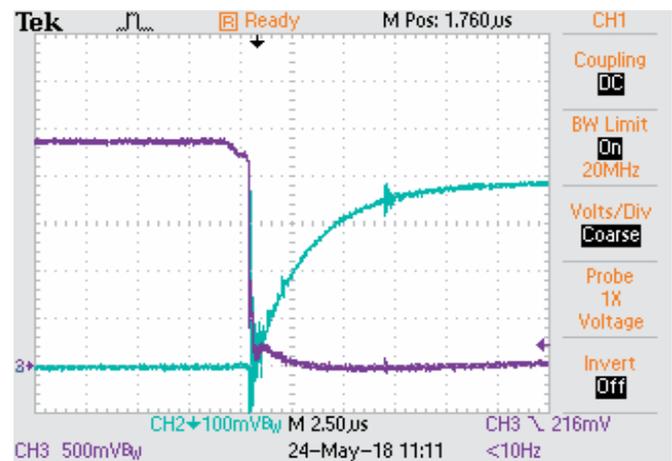


Рис. 4. Осциллограммы напряжения на двух последовательно включенных тиристорах (фиолетовая) и переднего фронта тока через испытуемый прибор с самозащитой (голубая) при амплитуде тока 290 А

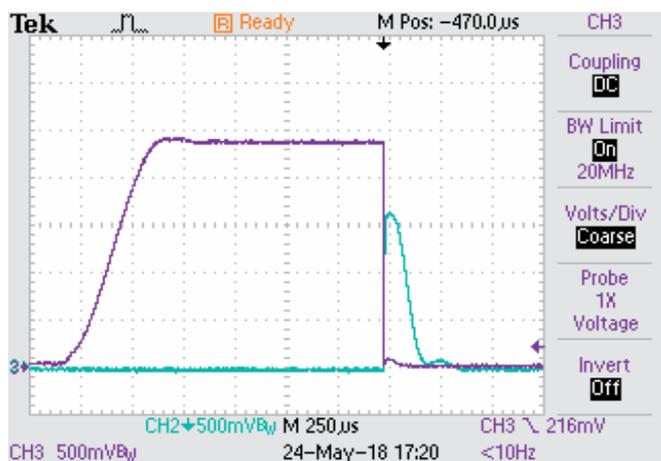


Рис. 5. Осциллограммы напряжения на двух последовательно включенных тиристорах (фиолетовая) и тока через испытуемый прибор с самозащитой (голубая) при амплитуде тока 1250 А

тиристора, то есть с точки зрения потребителя будет аттестован не только прибор, но и система защиты, входящая в его структуру, что невозможно выполнить при использовании компонентов по отдельности. Основные параметры и характеристики разрабатываемого тиристора представлены в таблице.

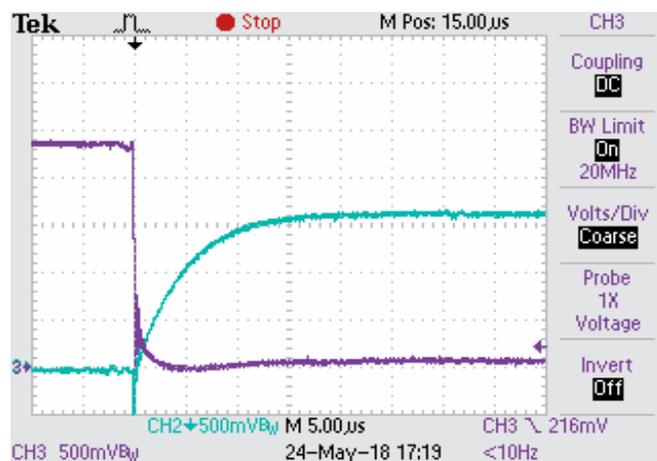
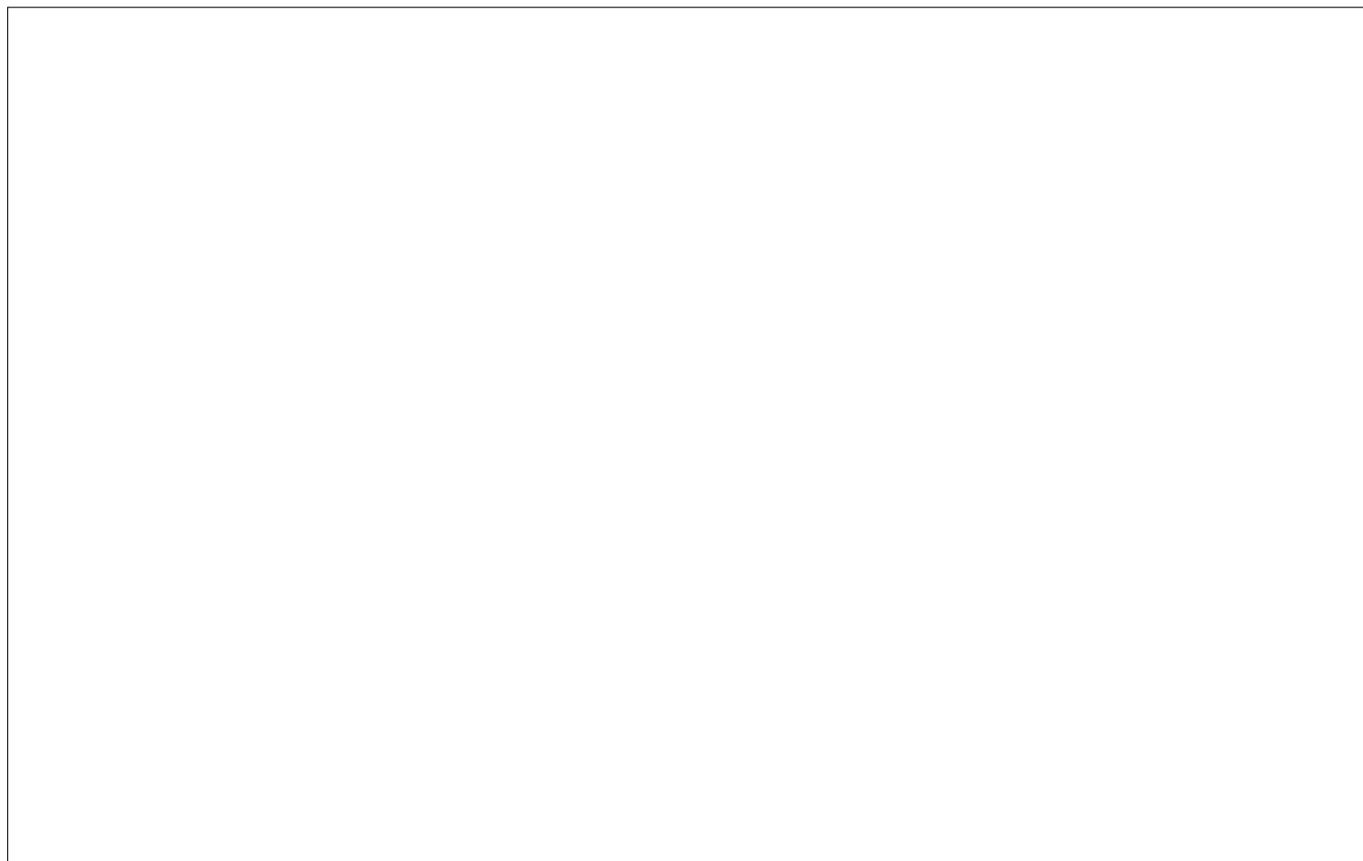


Рис. 6. Осциллограммы напряжения на двух последовательно включенных тиристорах (фиолетовая) и переднего фронта тока через испытуемый образец с самозащитой (голубая) при амплитуде тока 1250 А

* * *

Таким образом, в ходе испытания интегрированного механизма самозащиты от перенапряжения, полученного локальным облучением области управляющего электрода основного тиристора, была доказана его стабильность в условиях тепловых и электрических воздействий. Полученные



результаты сформировали предпосылки для разработки нового высоковольтного тиристора T483-1600-60 со встроенными элементами самозащиты в случае отказа драйвера управления, что облегчит конструкцию силовых преобразователей и снизит вероятность отказа из-за увеличения количества применяемых элементов системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Niedernostheide F.-J., Schulze H.-J., Kellner-Werdehausen U.** Self-protected high power thyristors // Proc. PCIM 2001. Power Conversion. Nuernberg. P. 51–56.
2. Adjustment method for a thyristor's reverse breakdown voltage uses negative- and positive-doped bases, a collector and an emitter along with hydrogen-induced donors / Reiner Dr. Barthelmess; Uwe Keller-

Основные параметры и характеристики тиристора T483-1600-60

Параметр	Норма	Условия измерений
V_{DRM}/V_{RRM}	6 000 В	$-60\text{ }^\circ\text{C} < T_j < 125\text{ }^\circ\text{C}$
I_{TAV}	1 600 А	$T_c = 98\text{ }^\circ\text{C}$; двухстороннее охлаждение
I_{tsm}	40 кА	$T_j = 125\text{ }^\circ\text{C}$, ($t_p = 10\text{ мс}$); единичный импульс ; $V_D = V_R = 0\text{ В}$
$(dV_D/dt)_{CRIT}$	2500 В/мкс	$T_j = 125\text{ }^\circ\text{C}$; $V_D = 4\text{ 000 В}$; управление разомкнуто
V_{TM}	2,4 В	$T_j = 25\text{ }^\circ\text{C}$; $I_{TM} = 5\text{ 024 А}$
V_{TM}	2,1 В	$T_j = 125\text{ }^\circ\text{C}$; $I_{TM} = 2\text{ 500 А}$
tgδ	2,0 мкс	$T_j = 25\text{ }^\circ\text{C}$; $V_D = 600\text{ В}$; $I_{TM} = 1\text{ 600 А}$
tq	400 мкс	$dV_D/dt = 50\text{ В/мкс}$; $T_j = 125\text{ }^\circ\text{C}$; $I_{TM} = 1\text{ 600 А}$; $di_R/dt = -5\text{ А/мкс}$; $V_R \geq 100\text{ В}$; $V_D = 4\text{ 000 В}$
Q_{RR}	3 500 мкКл	$T_j = 125\text{ }^\circ\text{C}$; $I_{TM} = 1\text{ 600 А}$; $di_R/dt = -5\text{ А/мкс}$; $V_R \geq 100\text{ В}$
Rthjc	0,0075 $^\circ\text{C/Вт}$	Двухстороннее охлаждение

Werdehausen; Franz-Josef Dr. Niedernostheide; Hans-Joachim Dr. Schulze (Infineon Technologies AG EUPEC GmbH (Infineon Technologies Bipolar GmbH and Co KG) // Патент DE10344592B4. Заявлено 25.09.2003. Опубликовано 19.05.2005.

3. Способ регулирования напряжения переключения силового полупроводникового прибора / Дерменжи П. Г. (Российская Федерация, от имени которой выступает министерство промышленности и торговли Российской Федерации) // Патент RU2474926C1. Заявлено 21.09.2011. Опубликовано 10.02.2013.
4. **Губарев В. Н., Семенов А. Ю., Столбунов В. С., Сурма А. М.** Технология протонного облучения и возможности ее применения для улучшения характеристик силовых диодов и тиристорov // Силовая электроника. 2011. № 5. С. 4–7.
5. **Дерменжи П. Г., Локтаев Ю. М., Сурма А. М., Черников А. А.** Новые высоковольтные мощные тиристоры со встроенными в полупроводниковую структуру элементами защиты в аварийных режимах // Силовая электроника. 2012. № 1. С. 64–66.
6. **Loktaev Y. M., Surma A. M., Chernikov A. A.** New high-voltage power thyristor with built-in protective elements in the semiconductor structure in case of emergency mode excess-voltage protection // Bodo's Power Systems № 11. 2011. P. 44–48.
7. **Козловский В. В., Козлов В. А., Ломасов В. Н.** Модифицирование полупроводников пучками протонов // Физика и техника полупроводников. 2000. Т. 34. Вып. 2. С. 129–147.