

# Новые двухпозиционные тиристорные модули на ток 700 А

## СО СНИЖЕННЫМИ СТАТИЧЕСКИМИ И ТЕПЛОВЫМИ ПОТЕРЯМИ

**Показаны результаты модернизации силовых двухпозиционных тиристорных и тиристорно-диодных модулей модификаций МТ3, МТ4, МТ5, МТ/Д3, МТ/Д4 и МТ/Д5 с шириной основания 60 мм, рассчитанных на напряжение 1800 В.**

**Дмитрий Титушкин  
Алексей Сурма  
Сергей Антонов**

### Введение

В настоящее время модернизация конструкции дискретных полупроводниковых приборов для повышения ресурса их работы, снижения электрических и тепловых потерь, а также увеличения рабочих мощностей остается одним из актуальных вопросов для низкочастотных силовых полупроводниковых тиристорных и диодов [3–4]. Это обусловлено в первую очередь постоянным ростом производства, передачи, преобразования и потребления энергии, а также необходимостью систематического улучшения параметров и технико-экономических показателей преобразовательной техники [1]. Однако применение типовых (для современных IGBT-модулей) подходов к повышению мощности силовых тиристорных и диодов не всегда целесообразно, так как данные подходы предполагают достаточно долгую и дорогостоящую модернизацию, включающую применение более дешевых и прогрессивных композитных материалов, сокращение количества элементов конструкции, а также изменение отдельных элементов конструкции для сокращения себестоимости массового производства. С учетом данных подходов срок вывода модернизированного продукта на рынок вырастает до 2–3 лет (которых зачастую нет у клиента), а затраты на разработку продукта увеличиваются до уровня 300 000–400 000 EUR, что негативно отражается на экономическом эффекте от внедряемых усовершенствований. К тому же возникают дополнительные риски, например в части длительных полевых испытаний у потребителя или сложностей при проведении сертификации продукции [2]. В связи с этим подход по оптимизации параметров и характеристик силовых полупроводниковых элементов с мини-

мальным уровнем переработки прочих элементов конструкции в настоящий момент остается все еще актуальным, причем использование современных средств моделирования позволяет уменьшить итерационность модернизации, сократить затраты на разработку и время вывода модернизированного продукта на рынок менее чем до года.

**Снижение статических и тепловых параметров в двухпозиционном модуле с шириной основания 60 мм**

По запросу от потребителя была проведена модернизация двухпозиционного силового тиристорного модуля типа А2 с шириной основания 60 мм, рассчитанного на напряжение 1800 В и средний ток 540 А (внешний вид модуля изображен на рис. 1).



**Рис. 1.** Внешний вид модуля А2 с шириной основания 60 мм

Текущая продуктовая линейка модулей типа А2 представлена на рис. 2.

В данном варианте конструкции электрический и тепловой контакт полупроводниковых элементов обеспечивается за счет прижимной конструкции, что обуславливает повышенную циклоустойкость и стойкость к ударным токам.

В процессе моделирования основных электрических параметров и характеристик были определены следующие решения, позволяющие достичь требуемых тепловых и электрических потерь модуля:

- увеличение диаметра полупроводникового элемента и оптимизация топологии для расширения активной площади катода на 10%;
- снижение удельного электрического сопротивления исходной кремниевой пластины;
- уменьшение толщины диффузионного элемента и оптимизация диффузионного профиля (на рис. 3 приведены данные по расчетным и экспериментальным значениям).

В результате изготовления опытной партии и проведения квалификационных испытаний были подтверждены основные результаты моделирования:

1. Статические потери — снижение порогового напряжения ( $V_{T(TO)}$ ) на 5%, динамического сопротивления ( $r_T$ ) на 10%. На рис. 4 приведены данные по расчетным и экспериментальным значениям статических потерь в открытом состоянии стандартного МТ\*-540-18-А2 и оптимизированного МТ\*-700-18-А2 тиристорного модуля в сравнении с измеренными значениями по аналогам от других производителей.
2. Тепловые потери — снижение теплового сопротивления переход-корпус ( $R_{thjc}$ ) на 10%. На рис. 5 приведены экспериментальные значения теплового сопротивления стандартного МТ\*-540-18-А2 и оптимизированного МТ\*-700-18-А2 тиристорного модуля в сравнении с измеренными значениями по аналогам от других производителей.
3. Ударный ток в открытом состоянии — увеличен на 20% при максимальной темпера-

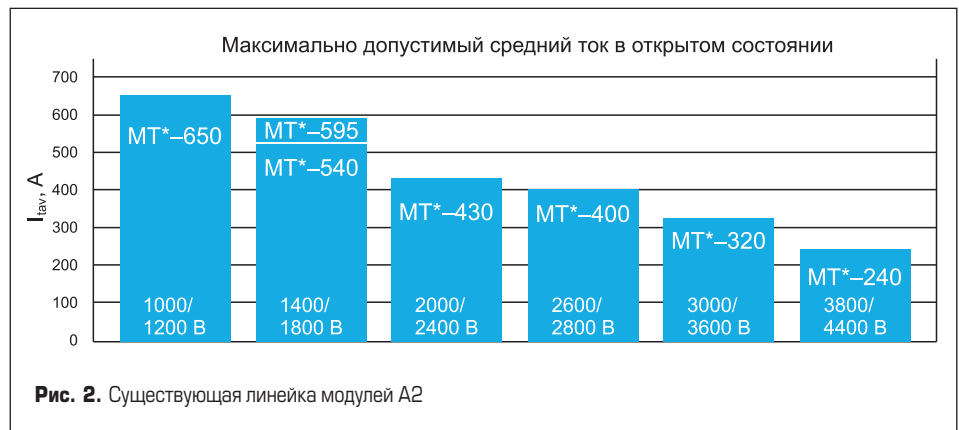


Рис. 2. Существующая линейка модулей А2

туре  $p-n$ -перехода  $T_{jmax} = +130$  °С. На рис. 6 приведены экспериментальные значения ударного тока в открытом состоянии для стандартного МТ\*-540-18-А2 и оптимизированного МТ\*-700-18-А2 тиристорного моду-

ля в сравнении с измеренными значениями по аналогам от других производителей. Таким образом, в ходе модернизации был разработан двухпозиционный модуль МТ\*-700-18 с увеличенным средним током в открытом

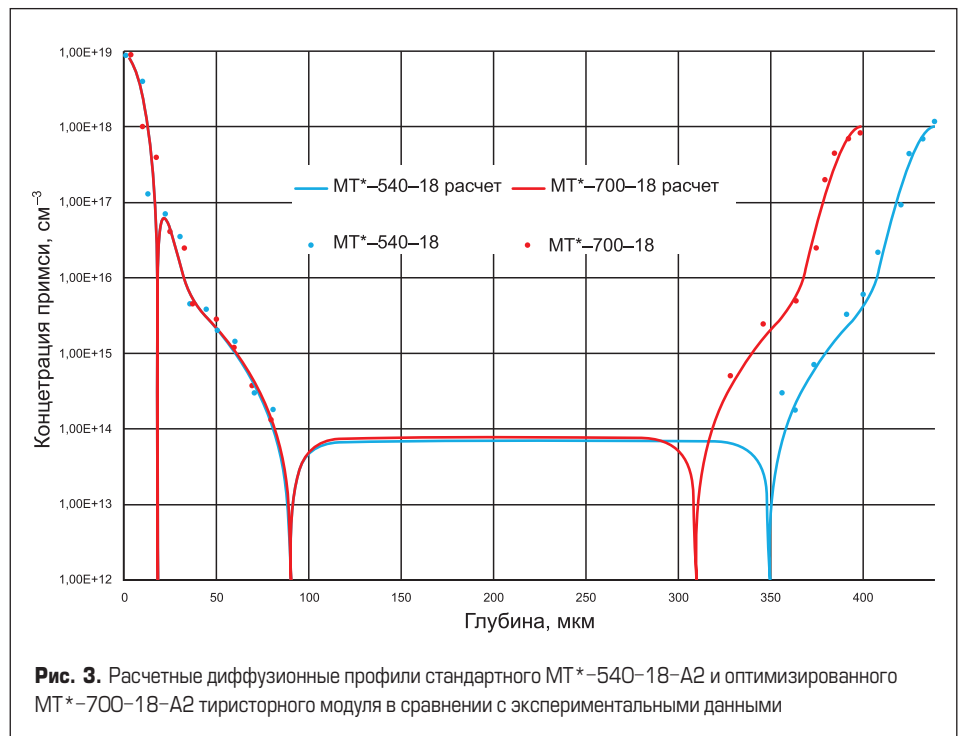


Рис. 3. Расчетные диффузионные профили стандартного МТ\*-540-18-А2 и оптимизированного МТ\*-700-18-А2 тиристорного модуля в сравнении с экспериментальными данными

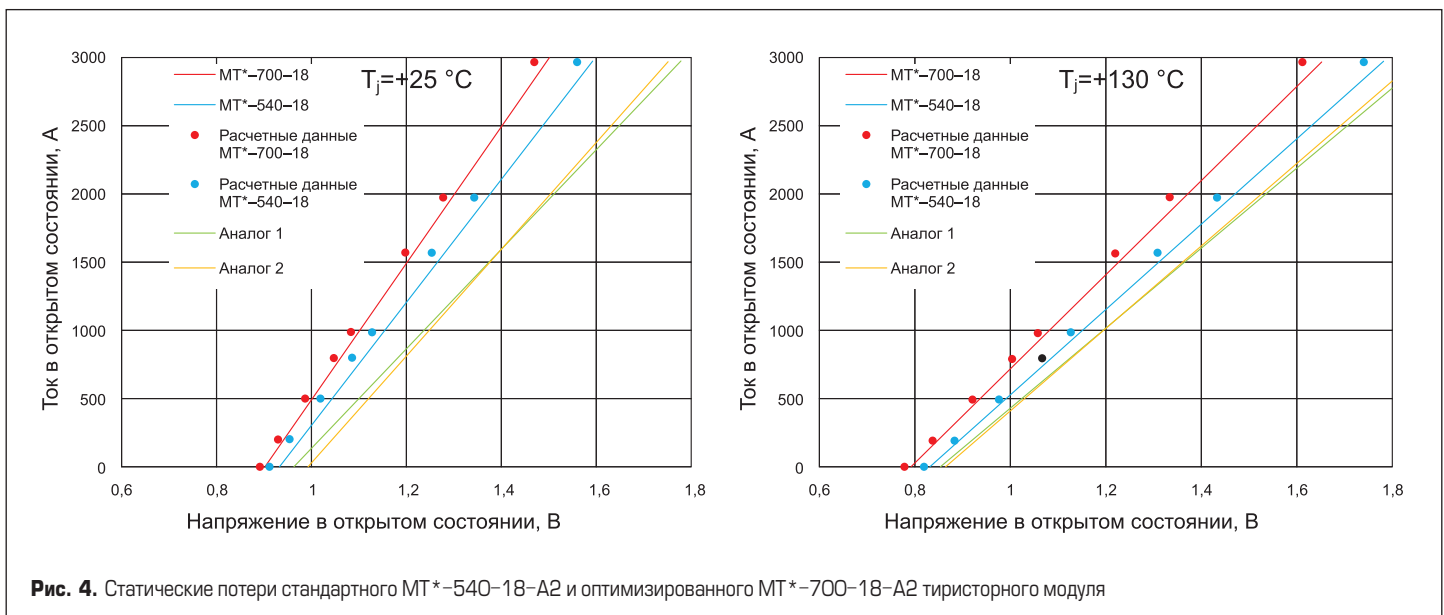
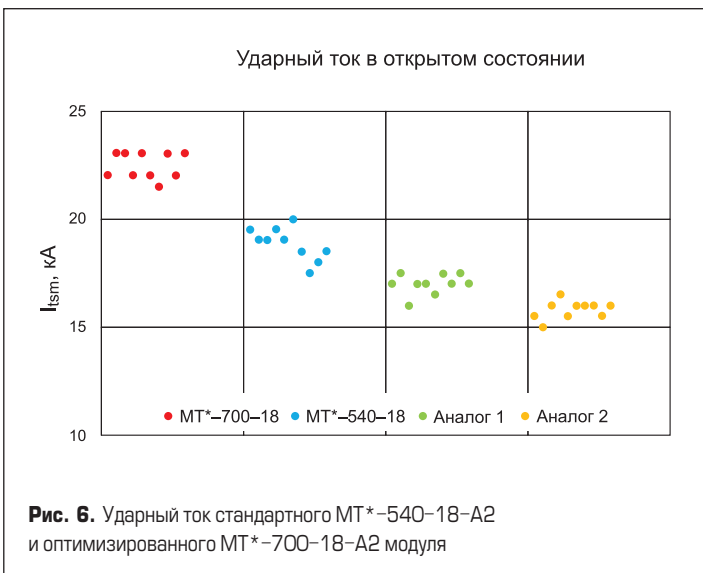
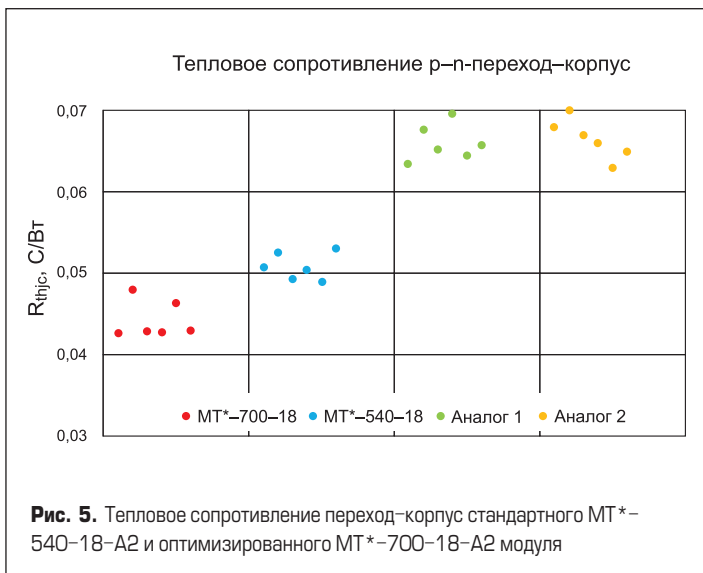


Рис. 4. Статические потери стандартного МТ\*-540-18-А2 и оптимизированного МТ\*-700-18-А2 тиристорного модуля



**Рис. 5.** Тепловое сопротивление переход-корпус стандартного MT\*-540-18-A2 и оптимизированного MT\*-700-18-A2 модуля

**Рис. 6.** Ударный ток стандартного MT\*-540-18-A2 и оптимизированного MT\*-700-18-A2 модуля

**Таблица.** Сравнение норм параметров

Обозначение и наименование параметра		MT*-540-18-A2 MT/Д*-540-18-A2	MT*-700-18-A2 MT/Д*-700-18-A2	Условия измерений
$I_{TAV}$	Максимально допустимый средний прямой ток в открытом состоянии, А	540 ( $T_c = +85^\circ\text{C}$ )	700 ( $T_c = +80^\circ\text{C}$ )	180° эл. синус; 50 Гц
$I_{TRMS}$	Действующий ток в открытом состоянии, А	845 ( $T_c = +85^\circ\text{C}$ )	1099 ( $T_c = +80^\circ\text{C}$ )	
$I_{TSM}$	Ударный ток в открытом состоянии, кА	15,5 ( $T_j = T_{jmax}$ ) 18 ( $T_j = +25^\circ\text{C}$ )	20 ( $T_j = T_{jmax}$ ) 23 ( $T_j = +25^\circ\text{C}$ )	180° эл. синус; $t_p = 10$ мс; единичный импульс; $U_D = U_R = 0$ В
$U_{DRM}$ $U_{RRM}$	Повторяющееся импульсное обратное напряжение и повторяющееся импульсное напряжение в закрытом состоянии, В	1400–1800		$T_{jmin} < T_j < T_{jmax}$ 180° эл. синус; 50 Гц
$I_{DRM}$ $I_{RRM}$	Повторяющийся импульсный обратный ток и повторяющийся импульсный ток в закрытом состоянии (макс.), мА	70 ( $T_j = T_{jmax}$ ) 3 ( $T_j = +25^\circ\text{C}$ )		$U_D = U_{DRM}$ ; $U_R = U_{RRM}$
$U_{TM}$	Импульсное напряжение в открытом состоянии (макс.), В	1,5 ( $I_{TM} = 1570$ А)	1,65 ( $I_{TM} = 2198$ А)	$T_j = +25^\circ\text{C}$
$R_{thjc}$	Тепловое сопротивление р-п-переход-корпус (макс.), °C/Вт	0,0325 (на модуль) 0,0650 (на позицию)	0,0255 (на модуль) 0,0510 (на позицию)	180° эл. синус; 50 Гц
$T_j$	Температура р-п-перехода, °C	-40...+130		

состоянии ( $I_{TAV}$ ) на ~ 30% до 700 А при температуре корпуса  $T_c = +80^\circ\text{C}$  и максимальной температуре р-п-перехода  $T_{jmax} = +130^\circ\text{C}$ . При этом прочие электрические параметры и характеристики модуля не изменились. На рис. 7 представлена текущая линейка двухпозиционных модулей А2 с шириной основания 60 мм производства «Протон-Электротекс» с учетом нового 700-А модуля.

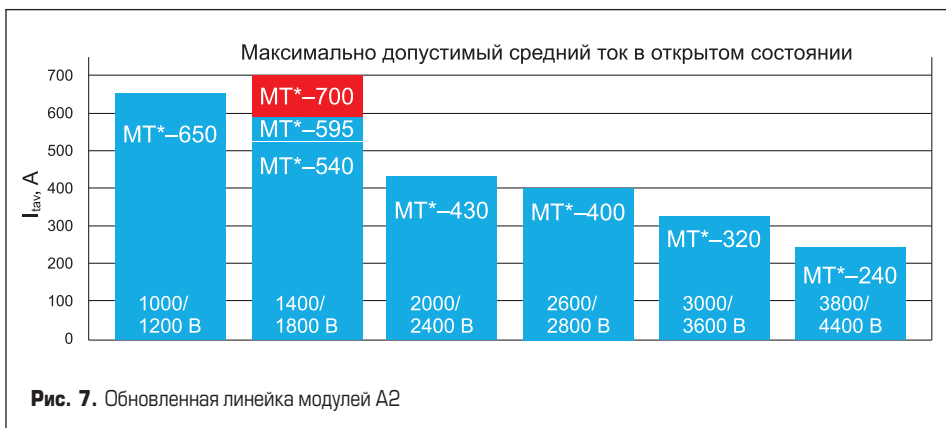
Основные отличия норм параметров стандартного MT\*-540-18-A2 и оптимизированного MT\*-700-18-A2 представлены в таблице.

**Выводы**

В данной работе продемонстрированы результаты модернизации силовых двухпозиционных тиристорных и тиристорно-диодных модулей модификаций МТ3, МТ4, МТ5, МТ/Д3, МТ/Д4 и МТ/Д5 с шириной основания 60 мм, рассчитанных на напряжение 1800 В со сниженными тепловыми и электрическими потерями. В результате модернизации был получен модуль с увеличенным до 700 А средним током в открытом состоянии, характеризующийся уменьшенным тепловым сопротивлением р-п-переход-корпус, пороговым напряжением и динамическим сопротивлением, а также увеличенным ударным током без снижения показателей надежности и долговечности продукта.

**Литература**

- Bordignon P. VSC Conversion Technology for HVDC & FACTS, State of the Art and Future Trend. 2019 21st European Conference on Power Electronics and Applications (EPE '19 ECCE Europe).
- Titushkin D., Surma A., Antonov S. Increasing power density in power modules with baseplate width of 60 mm. Conference PCIM Europe 2020. Nuremberg, Germany, 7–8 July, 2020.
- Grishanin A. V., Martynenko V. A., Khapugin A. A., Varyanova G. M., Baru A. Y. New thyristor mega-module for megawatt-range frequency converters. PCIM 2012.
- Titushkin D., Surma A. New ways to produce fast power thyristors // Bodo's Power Systems. 2015. Vol. 8.



**Рис. 7.** Обновленная линейка модулей А2